



Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

COPIA SIMPLE DEL ACTA DE EXAMEN DE GRADO

**UNIDAD ACADÉMICA DE
DOCTOR EN ESTUDIOS
DEL DESARROLLO**

De: ROBLES BERUMEN RUTH.

En la ciudad de Zacatecas, Zac., a veintiún días del mes de julio del año dos mil veinte, reunidos en Jurado de Examen: DRA MARIA JOSEFINA MORALES RAMIREZ, DR MARIO ENRIQUE FUENTE CARRASCO, DR JOSE ANTONIO DENIZ ESPINOS, DR EDGAR ZAYAGO LAU, DR. GUILLERMO RICARDO FOLADORI ABELEDO.

ACTA NO. 67716

Bajo la presidencia de la última persona en citar, en cumplimiento con el Acuerdo de la Rectoría de la Universidad Autónoma de Zacatecas, "Francisco García Salinas", de la fecha catorce del mes de julio del año dos mil veinte, se procedió a practicar EXAMEN DE GRADO DE DOCTOR EN ESTUDIOS DEL DESARROLLO, que de conformidad con el Estatuto General Vigente, presentó:

**ACTA DE EXAMEN DE
GRADO DE DOCTOR EN
ESTUDIOS DEL
DESARROLLO**

ROBLES BERUMEN RUTH

Preguntando por todo el tiempo que previene éste, el jurado respectivo tuvo a bien declarar,

APROBARLA POR MENCIÓN HONORIFICA

Lo que hizo saber al sustentante, firmando las personas que formaron parte del jurado:

Guillermo Foladori Abeledo
**DR. GUILLERMO RICARDO FOLADORI ABELEDO
PRESIDENTE**

Edgar Zayago Lau
**DR EDGAR ZAYAGO LAU
SECRETARIO**

Jose Antonio Deniz Espinos
**DR JOSE ANTONIO DENIZ ESPINOS
VOCAL**

Mario Enrique Fuente Carrasco
**DR MARIO ENRIQUE FUENTE CARRASCO
VOCAL**

Maria Josefina Morales Ramirez
**DRA MARIA JOSEFINA MORALES RAMIREZ
VOCAL**

Leída que fue el acta anterior y habiendo sido protestado al sustentante en forma, para el fiel y leal desempeño del grado, cuyo título en esta fecha adquiere, habiendo aceptado las responsabilidades inherentes a ésta, los miembros del jurado acordaron hacer entrega de la documentación respectiva. Así mismo, en esta fecha se entregó copia certificada de la presente acta.

**DR. RUBEN DE JESUS IBARRA REYES
SECRETARIO GENERAL DE LA U.A.Z.**

ORIGINAL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
“FRANCISCO GARCÍA SALINAS”
UNIDAD ACADÉMICA EN ESTUDIOS DEL DESARROLLO
DOCTORADO EN ESTUDIOS DEL DESARROLLO



**DESARROLLO TECNOLÓGICO, LEGISLACIÓN AMBIENTAL Y DEGRADACIÓN
DEL AMBIENTE DE LA MINERÍA DE MÉXICO DURANTE LAS DOS PRIMERAS
DÉCADAS DEL SIGLO XXI**

TESIS PRESENTADA POR

Ruth Robles Berumen

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA EN ESTUDIOS DEL DESARROLLO

Directores:

Director Dr. Guillermo Foladori

Codirector Dr. Edgar Záyago Lau

Zacatecas, Zac., México, julio de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Robles, Ruth

Desarrollo tecnológico, legislación ambiental y degradación del ambiente de la minería de México durante las dos primeras décadas del siglo XXI

Por: Ruth Robles Berumen – Zacatecas, Zac. México, 2020

Director: Dr. Guillermo Foladori Abeledo

Codirector: Dr. Edgar Záyago Lau

Tesis de Doctorado en Estudios del Desarrollo, Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica en Estudios del Desarrollo

Palabras clave: minería; México; desarrollo tecnológico; legislación ambiental; degradación del ambiente

I. Dr. Guillermo Foladori Abeledo II. Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica en Estudios del Desarrollo III. Desarrollo tecnológico, legislación ambiental y degradación del ambiente de la minería de México durante las dos primeras décadas del siglo XX

Citar esta tesis como:

Robles, R. (2020). *Desarrollo tecnológico, legislación ambiental y degradación del ambiente de la minería de México durante las dos primeras décadas del siglo XXI*. Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica en Estudios del Desarrollo.

Las naciones que están aún cegadas por el brillo de los metales preciosos, y por ello adoran todavía el fetiche del dinero metálico, no son aún las naciones dinerarias perfectas (Marx [1844], 2001).

A toda mi familia, en especial a mi abuelo paterno
Ciro Robles Escamilla (†) quién forma parte de la
historia de la minería en Zacatecas, y a Andrés
Martínez Ortiz (†) un gran luchador social.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme una beca que me ayudó a continuar mis estudios de doctorado en Estudios del Desarrollo. Una nueva área de conocimiento en mi trayectoria profesional.

En ese mismo sentido agradezco a la Unidad Académica en Estudios del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Zacatecas por permitirme ingresar al Programa de Doctorado en Estudios del Desarrollo y concluir mis estudios. Reconozco el esfuerzo de los profesores que forman parte de esta institución quienes me brindaron un nuevo horizonte académico, donde he expresado toda mi experiencia profesional en el estudio de la minería. En especial al Dr. Guillermo Foladori Abeledo, mi director principal, quien a través de sus clases y conversaciones me encausó en la investigación y me ayudó a entender el mundo desde la visión crítica de las ciencias sociales. Un aspecto que complementó mi desarrollo profesional y me transformó como ser humano.

Mis respetos al Dr. José Deniz Espinos por su sencillez, experiencia y el tiempo que me dedicó para estructurar mi proyecto de investigación. Gracias al Dr. Edgar Záyago Lau por la confianza otorgada en el desarrollo de mi tesis. Agradezco a la Dra. Josefina Morales Ramírez su interés por participar en mi comité de tesis, sus ponencias en el patio de Rectoría siempre serán recordadas. Reconozco la disponibilidad que mostraron la Dra. Aleida Azamar Alonso, la Dra. Cindy McCulling y el Dr. Mario Enrique Fuente Carrasco cuando leyeron mi tesis en su fase inicial, aprecio sus comentarios. Mi gratitud a la gente que forma parte de este doctorado en las diferentes áreas, en especial a Norma por su ayuda administrativa.

Retribuyo a la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra por haberme abierto las puertas como docente en esta Universidad, y darme la oportunidad de adquirir gran parte de los conocimientos técnicos para consolidar la presente investigación. Un espacio que facilitó mi ingreso a la Asociación de Ingenieros de Minas Metalúrgicos y Geólogos de México (AIMMGM) donde pude entender con mayor veracidad la dinámica de la actividad

minera en México. Gracias a todos mis exalumnos y exalumnas que me brindaron su tiempo y conocimiento en esta importante actividad.

Agradezco al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) unidad Saltillo, por permitirme desarrollar una estancia en el laboratorio de metalurgia extractiva. En especial a la Dra. Fabiola Nava Alonso y a los Dres. Alejandro Uribe Salas, Juan Carlos Fuentes Aceituno y Roberto Pérez Garibay con quienes me siento sumamente agradecida por haberme ayudado a entender la problemática del cianuro de sodio y del agua en la minería. También agradezco a la Gerencia Operativa de los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas de los Acuíferos de Calera y Chupaderos, la información y experiencia compartidas.

Con especial amor a mis padres cuyo legado ha sido el trabajo honesto. A todos mis hermanos, hermanas, sobrinos y sobrinas. Sin olvidar que Ciro, Hermes, José Ricardo y Karina también han cursado estudios de doctorado, y que con su ejemplo me alentaron a terminar esta investigación. Agradezco la atención que me prestó mi sobrino José Ricardo, quien con su experiencia en el sector automotriz me ayudó a entender cómo funcionan las nuevas tecnologías mejor conocidas como Industria 4.0.

Mi gratitud a Andrés Martínez Ortiz, por haber puesto a mi disposición su biblioteca y experiencia. Aprecio haber formado parte de todos los proyectos que juntos emprendimos, los cuales me ayudaron a entender la dinámica social a través de las múltiples dificultades solventadas.

No olvido a mis compañeros y compañeras de la GFU, en especial a los maestros Miguel Aranda Troncoso y Sergio García Victoria quienes desinteresadamente comparten sus conocimientos. Tampoco olvido a mis compañeros de la quinta generación de este doctorado, su compañía hizo muy amena esta etapa de mi vida. En especial a aquellos que siempre nos frecuentamos para apoyarnos y darnos fortaleza. Gracias a todos mis amigos y amigas que mostraron interés en mi investigación.

Mi reconocimiento a todas las instituciones donde me he forjado y donde he recibido la experiencia profesional que me ha permitido concluir esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
A.1 El objeto de estudio y su dimensión.....	9
A.2 Pregunta de investigación	11
A.3 Objetivos.....	12
A.4 Hipótesis	12
A.5 Estrategia metodológica.....	13
CAPÍTULO 1 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LA MINERÍA DEL SIGLO XXI	16
CAPÍTULO 2 METABOLISMO SOCIAL, LEGISLACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	25
CAPÍTULO 3 CONTEXTO DE LA MINERIA EN EL SIGLO XXI.....	42
3.1 El neoliberalismo y la minería en México.....	42
3.2 La producción de metales en el mundo.....	65
3.2.1 Los metales en el contexto nacional.....	83
CAPÍTULO 4 DESARROLLO TECNOLÓGICO Y LA MINERÍA DE MÉXICO	89
4.1 Evolución de la tecnología en la minería	89
4.2 Nuevos avances tecnológicos en la minería	98
4.3 Implicaciones socioeconómicos y ambientales de Industria 4.0 en la minería.....	108
4.3.1 Concentración y centralización del capital	108
4.3.2 Implicaciones laborales directas	112
4.3.3 Implicaciones ambientales.....	115
CAPÍTULO 5 LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL Y LA MINERÍA DE MÉXICO.....	120

5.1 Desarrollo de la legislación ambiental.....	120
5.1.1 La aplicación de la legislación ambiental	134
5.2 La legislación ambiental y su aplicación en la minería	142
5.3 La legislación ambiental y el manejo del agua en la minería	149
5.4 La legislación ambiental y el manejo de las sustancias químicas en la minería.....	162
5.5 La legislación ambiental y el manejo de los jales en la minería	181
5.6 La legislación ambiental y los gases efecto invernadero en la minería.....	194
5.7 La legislación ambiental y el principio de precaución	202
CAPÍTULO 6 LA DEGRADACIÓN DEL AMBIENTE Y LA MINERÍA DE MÉXICO.....	215
6.1 Los procesos mineros y su interrelación con el ambiente.....	215
6.2 Contaminantes emitidos y transferidos por la minería	247
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	265
ANEXOS.....	280
REFERENCIAS	290

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Producción de oro, plata, plomo y zinc por la gran minería en México durante 2018	9
Cuadro 2 Proyectos mineros operados por empresas de capital nacional.....	10
Cuadro 3 Documentos publicados sobre minería en la base de datos de Scopus por país 2000-2020.....	18
Cuadro 4 Organización de las empresas paraestatales en 1982.....	46
Cuadro 5 Algunas operaciones de venta de minas concluidas durante el periodo 1988-1994	48
Cuadro 6 Desincorporación de zonas de reserva minera periodo 1990 - 2017 (miles de hectáreas).....	49
Cuadro 7 Principales cambios efectuados en la Ley Minera de 1992 en comparación con las anteriores	52
Cuadro 8 Superficie concesionada durante el periodo 1994 – 2017 (miles de hectáreas) .	54
Cuadro 9 Cartografía elaborada por el SGM durante el periodo 1994 - 2017.....	62
Cuadro 10 Producción minera mundial por tipo de metal y principales países productores 2018.....	67
Cuadro 11 Suministro y demanda del oro 2010 – 2018 (toneladas)	68
Cuadro 12 Costos totales de producción de una onza de oro por región	73
Cuadro 13 Suministro y demanda de la plata 2009 - 2018 (toneladas).....	74
Cuadro 14 Principales empresas productoras de plata a nivel mundial	76
Cuadro 15 Principales minas de plata en el mundo y su producción 2017 – 2018 (toneladas).....	77
Cuadro 16 Producción de plata por origen del metal en el 2018	78
Cuadro 17 Suministro y uso del plomo y del zinc 2014 - 2019	79
Cuadro 18 Nuevos proyectos y minas en expansión proveedoras de zinc fuera de China y su producción 2017 – 2018 (miles de toneladas).....	82
Cuadro 19 Participación de México en la producción minera nacional y mundial 2018.....	84
Cuadro 20 Principales minas productoras de oro en México	84
Cuadro 21 Principales minas productoras de plata en México.....	85
Cuadro 22 Principales minas productoras de plomo y zinc en México.....	86
Cuadro 23 Principales minas productoras de cobre en México.....	87
Cuadro 24 Elementos de un sistema de control y automatización inteligente para un proceso minero.....	101

Cuadro 25 Áreas en desarrollo para la transformación digital en la minería	102
Cuadro 26 Ejemplos de tecnologías de control y automatización de venta en el mercado	104
Cuadro 27 Porcentaje de producción de metales metálicos durante el año 2017 por grupos de empresas	111
Cuadro 28 Monitoreo de algunos impactos ambientales por Dispatch	117
Cuadro 29 Evolución de la legislación ambiental mexicana.....	121
Cuadro 30 Principales leyes y reglamentos ambientales de competencia federal aplicables a la minería	143
Cuadro 31 Principales normas oficiales mexicanas en materia ambiental aplicables a la minería.....	145
Cuadro 32 Normas oficiales mexicanas en materia ambiental aplicables a la minería, a cargo de autoridades de salud	147
Cuadro 33 Concesiones de agua otorgadas a Minera Peñasquito.....	154
Cuadro 34 Principales leyes que regulan las sustancias químicas en México en materia ambiental.....	167
Cuadro 35 Sustancias químicas adicionadas a un proceso de flotación selectiva de plomo, cobre y zinc	169
Cuadro 36 Registros de importación relacionados con sustancias químicas de los años 2010 y 2013	174
Cuadro 37 Propiedades relevantes de los lixiviantes más estudiados en el mundo	176
Cuadro 38 Toxicidad de las especies de cianuro y las especies relacionadas con el cianuro que pueden ser encontradas en las pilas de lixiviación	179
Cuadro 39 Diferencias entre el manejo de jales acuosos y secos	186
Cuadro 40 Principales empresas del sector metalúrgico emisoras de bióxido de carbono según información del RETC (2018)	201
Cuadro 41 Leyes ambientales mexicanas y su relación con el principio de precaución....	212
Cuadro 42 Procesos desarrollados por algunas empresas mineras en México	216
Cuadro 43 Vegetación removida en el proyecto minero Peñasquito	219
Cuadro 44 Cantidad de explosivos utilizados por algunas empresas mineras según información de manifestaciones de impacto ambiental.....	222
Cuadro 45 Recuperación de metales antes y después de la instalación de la planta de lixiviación de concentrados de pirita.....	237
Cuadro 46 Sustancias emitidas y transferidas en México durante el año 2017	250

Cuadro 47 Emisiones y transferencias de contaminantes de las empresas mineras y del sector metalúrgico en el año 2017 (toneladas).....	251
Cuadro 48 Cantidades emitidas y transferidas de sustancias químicas durante el 2017 por tipo de minería (toneladas)	252
Cuadro 49 Emisiones y transferencias de sustancias químicas en la minería de oro, de plata, de zinc y plomo, de cobre níquel, de hierro, de manganeso, de mercurio y antimonio y de otros minerales metálicos no ferrosos (kilogramos por año)	257
Cuadro 50 Principales empresas mineras generadoras de bióxido de carbono en México durante el año 2017	259
Cuadro 51 Principales empresas del sector metalúrgico que reportaron emisiones de bióxido de carbono durante el año 2017	260
Cuadro 52 Empresas mineras que reportaron la emisión de óxido nitroso en el RETC 2017 (kilogramos).....	261
Cuadro 53 Toneladas de bióxido de carbono equivalente emitidas por kilogramo de oro producido en la empresa Minera Peñasquito (2017).....	262

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Proyectos mineros en etapa productiva por estado en México.....	11
Gráfica 2 Documentos publicados sobre minería en la base de datos de Scopus 2000-2020	16
Gráfica 3 Líneas de investigación en minería con mayor número de ocurrencias (2000-2020).....	24
Gráfica 4 Fabricación de joyería de oro por regiones 2018	69
Gráfica 5 Producción de oro por regiones mundiales durante el 2018	71
Gráfica 6 Destinos de la demanda de la plata durante el 2018	75
Gráfica 7 Producción de plata por regiones mundiales durante el 2018.....	78
Gráfica 8 Usos principales del plomo	80
Gráfica 9 Usos principales del zinc	81
Gráfica 10 Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2018 (241 634 millones de pesos).....	87
Gráfica 11 Producción de oro y plata durante la época colonial 1521-1821.....	92
Gráfica 12 Producción de oro y plata en el porfiriato (segundo periodo) y en el periodo ISI (tercer periodo)	94
Gráfica 13 Producción de oro en kilogramos años 1915 - 2016, versus precio nominal promedio mensual por onza en dólares.....	96

Gráfica 14 Producción de plata en toneladas años 1915 - 2016, versus precio nominal promedio mensual por onza en dólares.....	97
Gráfica 15 Porcentajes anuales de inversión para la adquisición de equipo durante el periodo 2008 – 2017 por parte de las empresas afiliadas a CAMIMEX.....	109
Gráfica 16 Porcentajes promedio de inversión en varios rubros durante el periodo 2008 – 2017 por parte de las empresas afiliadas a CAMIMEX.....	110
Gráfica 17 Patentes de reactivos de flotación en el periodo 1921 - 1950.....	163
Gráfica 18 Patentes de reactivos de flotación en el periodo 1921 - 1950.....	164
Gráfica 19 Especiación del ion cianuro (CN-) y el ácido cianhídrico (HCN) en relación al pH	176
Gráfica 20 Accidentes de presas de jales	183
Gráfica 21 Distribución de accidentes de presas de jales por región	183
Gráfica 22 Distribución de fallas de presas de jales por causa	184
Gráfica 23 Estudios de riesgo ambiental ingresados por tipo de industria 1992 - 2015 ...	211
Gráfica 24 Consumo de energía por parte de las empresas mineras, incluyendo aquellas que producen no metales 2003 -2017	241
Gráfica 25 Producción de oro y consumo de energía por las empresas mineras, incluyendo aquellas que extraen no metales 2003 – 2017	242
Gráfica 26 Emisiones de CO ₂ -e en la minería (con excepción de combustibles) y cantería, y en la producción de metales no ferrosos (Gg), periodo 2000-2017	243
Gráfica 27 Emisión de partículas sólidas PM ₁₀ y PM _{2.5} por diversos sectores industriales durante el año 2016	244
Gráfica 28 Emisión de partículas sólidas PM ₁₀ y PM _{2.5} por las empresas mineras, incluyendo aquellas que producen no metales, durante el periodo 2008 – 2016.....	245
Gráfica 29 Generación de residuos peligrosos por sectores durante el periodo de 2004-2014	246
Gráfica 30 Emisiones y transferencia de contaminantes por sectores mayoritarios RETC 2017	251
Gráfica 31 Análisis porcentual del NPRI 2017	253
Gráfica 32 Análisis porcentual del TRI 2017	255
Gráfica 33 Disposiciones y emisiones al ambiente por tipo de actividad TRI 2017	256

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa científico 1, grupos de investigación en la minería 2000-2020.....	19
--	----

Figura 2 Mapa científico 2, líneas de investigación en la minería coloreadas según su aparición en el periodo 2000-2020	20
Figura 3 Polígonos mineros concesionados en la ciudad de Zacatecas	57
Figura 4 Fotografía de un sistema de control de una planta de flotación selectiva de cobre y zinc	105
Figura 5 Fotografía de pilas de lixiviación	173
Figura 6 Fotografía panorámica de un circuito de molienda en Minera Peñasquito	224
Figura 7 Fotografía de bandas transportadoras de mineral entre los circuitos de trituración y molienda	225
Figura 8 Diagrama de un proceso de flotación	226
Figura 9 Fotografía de un tanque de recirculación del agua de proceso de flotación selectiva	228
Figura 10 Fotografía que muestra el desarrollo del proceso de lixiviación	231
Figura 11 Diagrama de un proceso de lixiviación por pilas	232
Figura 12 Fotografía de los tanques de lixiviación de pirita de Minera Peñasquito	238

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Reseña de los principales eventos mineros a los que se asistió para desarrollar la presente investigación.....	280
Anexo 2 Proyectos mineros en fase de producción operados por empresas de capital extranjero en México	282
Anexo 3 Principales líneas de investigación en la minería 2000 - 2020.....	285
Anexo 4 Minas con mayor producción de oro a nivel mundial.....	287
Anexo 5 Fuentes de extracción y aprovechamiento de agua de Minera Peñasquito.....	288

LISTA DE SIGLAS

ACA	Nuevo Acuerdo de Cooperación Ambiental
ACAAN	Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte
AIMMGM	Asociación de Ingenieros de Minas Metalúrgicos y Geólogos de México
ANFO	Nitrato de amonio y diésel (por sus siglas en inglés)
ASEA	Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos
BMNT	Austrian Federal Ministry of Sustainability and Tourism
CAMIMEX	Cámara Minera de México
CAS	Sociedad Americana de Química (por sus siglas en inglés)
CBA	Análisis de costo-beneficio (por sus siglas en inglés)
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental (por sus siglas en inglés)
CEDOCIT	Centro de Documentación en Ciencias de la Tierra
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIADI	Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones del Banco Mundial
CICC	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático
CINVESTAV	Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNA	Comisión Nacional del Agua
CNUDMI	Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional
COA	Cédula de operación anual
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CP	Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CPS	Sistemas ciber-físicos la computación en la nube (por sus siglas en inglés)
DGIRA	Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental
DGGIMAR	Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
DOF	Diario Oficial de la Federación
EEA	European Environmental Agency
EIA	Evaluación del impacto ambiental (por sus siglas en inglés)
ENCC	Estrategia Nacional de Cambio Climático
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
ERA	Evaluación de los riesgos ecológicos (por sus siglas en inglés)
GATT	Acuerdo General sobre Comercio y Aranceles (por sus siglas en inglés)
GEI	Gases efecto invernadero
GMI	Iniciativa Minería Global (por sus siglas en inglés)
HENAC	Hacia una Estrategia Nacional de Acción Climática
ICME	Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente (por sus siglas en inglés)
ICOLD	Comisión Internacional de Grandes Presas (por sus siglas en inglés)

IFCS	Foro Intergubernamental sobre Seguridad Química (por sus siglas en inglés)
ILA	International Lead Association
ILZSG	International Lead and Zinc Study Group
iNDC	Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (por sus siglas en inglés)
INE	Instituto Nacional de Ecología
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INEGyCEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero
IOMC	Programa Interinstitucional para la gestión racional de Productos Químicos (por sus siglas en inglés)
IoT	Internet de las cosas (por sus siglas en inglés)
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
ISI	Industrialización por Sustitución de Importaciones
JIAPAZ	Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Zacatecas
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LCA	Evaluación del ciclo de vida (por sus siglas en inglés)
LEGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LFMN	Ley Federal sobre Metrología y Normalización
LFPA	Ley Federal de Procedimiento Administrativo
LGCC	Ley General de Cambio Climático
LGPGR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
M2M	Comunicación máquina a máquina (por sus siglas en inglés)
MAC	Mines and Communities
MFA	Análisis del flujo del material (por sus siglas en inglés)
MIPS	Intensidad de materiales por unidad de servicio (por sus siglas en inglés)
MIR	Manifestación del impacto regulatorio
NMX	Normas mexicanas con carácter no obligatorio
NOM	Normas oficiales mexicanas
NOSCH	National Occupational Health and Safety Commission
NPRI	Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes de Canadá (por sus siglas en inglés)
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OCMAL	Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina
OMC	Organización Mundial del Comercio
OMPI	Organización Mundial de la Propiedad Intelectual
PECC	Programa Especial de Cambio Climático
PECE	Pacto para la Estabilidad y el Crecimiento Económico
PM	Materia particulada (por sus siglas en inglés)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PP	Principio de precaución
PPA	Programa para la Prevención de Accidentes

PRI	Partido Revolucionario Institucional
PROFEPA	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
RAN	Registro Agrario Nacional
RCS	Rig Control Systems
RENE	Registro Nacional de Emisiones
RETC	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
RFID	Identificación por radiofrecuencia (por sus siglas en inglés)
SA	Secretaría de Salud
SAD	Complejos fuertes de cianuro (por sus siglas en inglés)
SAICM	Enfoque Estratégico para el Manejo Adecuado de los Productos Químicos a Nivel Internacional (por sus siglas en inglés)
SAT	Servicio de Administración Tributaria
SCE	Sistema de Comercio de Emisiones
SCJN	Suprema Corte de Justicia de la Nación
SE	Secretaría de Economía
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEDUE	Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología
SEMARNAP	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEMIP	Secretaría de Minas e Industria Paraestatal
SENER	Secretaría de Energía
SGM	Sistema Geológico Mexicano
SINAT	Sistema Nacional de Trámites
SINEM	Sistema Integral sobre Economía Minera
SNIARN	Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales
STPS	Secretaría del Trabajo y Previsión
TLC	Tratado del Libre Comercio
T-MEC	Nuevo Tratado entre los Estados Unidos Mexicanos, los Estados Unidos de América y Canadá
TRI	Inventario de Liberación de Tóxicos de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
UE	Unión Europea
UN	Naciones Unidas (por sus siglas en inglés)
UNEP	United Nations Environmental Programme
USCOLD	Comisión de Grandes Presas de Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
WAD	Complejos débiles de cianuro (por sus siglas en inglés)

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Por ciento
µm	Micras
CO ₂ -e	Bióxido de carbono equivalente
g	Gramos

g/t	Gramos por tonelada
Gg	Gigagramos
h	Horas
ha	Hectáreas
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
km ²	Kilómetros cuadrados
l	Litros
l/m ² /h	Litros por metro cuadrado por hora
lps	Litros por segundo
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
mg	Miligramos
plg	Pulgadas
ppb	Partes por billón, gramos por tonelada
ppm	Partes por millón, miligramos por kilo o por litro
t	Toneladas
t/d	Toneladas por día
tCO ₂ -e	Toneladas de bióxido de carbono equivalente

RESUMEN

Desarrollo tecnológico, legislación ambiental y degradación del ambiente en la minería de México durante las dos primeras décadas del siglo XXI

TESIS DE DOCTORADO

Ruth Robles Berumen

La presente investigación estudia los procesos desarrollados por la gran minería para explotar y procesar minerales de oro, plata, plomo, zinc y cobre, desde tres vertientes: desarrollo tecnológico, legislación ambiental y degradación del ambiente. Se analizan con mayor énfasis la lixiviación en pilas y los procesos de flotación selectiva. Esta investigación comprueba cómo las nuevas tecnologías adoptadas por la minería y la legislación ambiental han contribuido a degradar el ambiente. Un hecho que disminuye los costos de explotación de los minerales y coloca a México como uno de los países más atractivos de Latinoamérica para recibir inversión extranjera. Es una investigación que analiza aspectos históricos y estructurales de la minería, así como datos cuantitativos y cualitativos procedentes de entrevistas y de ámbitos gubernamentales, académicos y comerciales. Los elementos clave para consolidar esta investigación fueron la observación en eventos mineros como la Convención Internacional de Minería (2019) y las visitas a minas.

Palabras clave: minería; México; desarrollo tecnológico; legislación ambiental; degradación del ambiente

ABSTRACT

Technological development, environmental legislation and environmental degradation in mining in Mexico during the first two decades of the 21st century

DOCTORAL THESIS

Ruth Robles Berumen

This research studies the processes developed by large-scale mining to exploit and process gold, silver, lead, zinc and copper minerals, from three aspects: technological development, environmental legislation and environmental degradation. Heap leaching and selective flotation processes are discussed with greater emphasis. This research verifies how new technologies adopted by mining and environmental legislation have contributed to degrading the environment. A fact that lowers the exploitation costs of minerals and places Mexico as one of the most attractive countries in Latin America to receive foreign investment. It is an investigation that analyzes historical and structural aspects of mining, as well as quantitative and qualitative data from interviews and from governmental, academic and commercial fields. The key elements to consolidate this research were observation at mining events such as the International Mining Convention (2019) and visits to mines.

Key words: mining; Mexico; technological development; environmental legislation; environmental degradation

INTRODUCCIÓN

Durante las dos últimas décadas, la minería ha llamado la atención de diversos actores en la sociedad debido a los impactos sociales y ambientales que ha ocasionado. Un estudio bibliométrico realizado sobre la base de datos de *Scopus* durante el periodo 2000-2020, mostró que las publicaciones en minería tienen una tendencia al alza y que las líneas de investigación más investigadas son: impacto ambiental; efectos económicos, ecológicos y sociales de la minería; leyes y regulaciones mineras; tecnología de automatización; recursos minerales; y protección ambiental. Esta orientación es una prueba de la preocupación que existe a nivel mundial por el desempeño de esta actividad.

En este entorno, la presente investigación estudia los procesos desarrollados por la gran minería para extraer y procesar minerales de oro, plata, plomo, zinc y cobre desde tres vertientes: desarrollo tecnológico, legislación ambiental y degradación del ambiente. Se estudian con mayor énfasis los procesos de flotación selectiva y los procesos de lixiviación en pilas.^{1 2} Empero, no se estudia la minería donde el cobre es el principal producto, aunque para fines estadísticos se considera en algunos apartados. El objetivo principal es investigar cómo los nuevos avances tecnológicos y la legislación ambiental han contribuido a aumentar la degradación ambiental generada por la minería durante las dos primeras décadas del siglo XXI.

El tema contempla el estudio de la gran minería de todos los estados de México, que comprende a las empresas que explotan más de 70 mil toneladas de mineral por mes según

¹ La flotación selectiva es un proceso utilizado en las minas polimetálicas para separar los minerales con contenidos de oro, plata, plomo, zinc, cobre y otros metales. Esta separación se logra adicionando cierto tipo de sustancias químicas a la pulpa (mineral con agua) que permiten que las partículas de mineral se vuelvan hidrófobas (no se asocian con el agua) y se adhieran a las burbujas de aire que circulan a través de las celdas de flotación. Luego, los minerales se concentran en la superficie de la solución procesada en una zona espumosa, a partir de la cual, por rebosamiento los minerales se recuperan en concentrados.

² La lixiviación en pilas es un proceso normalmente realizado a cielo abierto que coloca rocas minerales trituradas en pilas o camas secuenciales, las cuales son previamente mezcladas con una sustancia alcalina, como la cal común. Cada pila es regada por goteo con una solución alcalina de cianuro de sodio durante algunas semanas para disolver los metales preciosos antes de colocar la siguiente pila. La solución obtenida rica en valores es procesada para obtener barras con contenidos de oro, plata y otros metales, comúnmente conocidas como barras doré.

el Reglamento de la Ley Minera (2014) (DOF, 2014e, p. 5 art. 9); y que en la actualidad produce más del 93 % del oro, plata, plomo, zinc y cobre en México (SGM, 2019a, p. 20).^{3 4} En especial se hace referencia al estado de Zacatecas debido a que: i) es el primer productor de plata, plomo y zinc a nivel nacional; ii) aportó el 8 % de la plata a nivel mundial en el 2018; iii) posee tres de las minas más grandes de plata en el mundo: Saucito, Fresnillo y la Colorada; y iv) están representadas en esta entidad las empresas líderes mundiales en producción de plata y oro: Newmont Goldcorp y Fresnillo plc.

Se trata de una investigación interdisciplinaria donde han confluído tanto las ciencias naturales como las ciencias sociales. Es una investigación que analiza aspectos históricos y estructurales de la minería, así como datos cuantitativos y cualitativos procedentes de entrevistas y de ámbitos gubernamentales, académicos y comerciales. Lo novedoso de esta investigación es que no surgió propiamente del análisis de información publicada en la web. El elemento clave fue la observación en eventos mineros como la Reunión Internacional de Minería (2018), el XXVII Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva (2018) y el V Seminario sobre depósito de jales en la Universidad Autónoma de Guanajuato (2019).

La minería es una actividad centenaria en los países latinoamericanos, pese a las diferencias geográficas y temporales, esta actividad ha incorporado constantemente nuevas tecnologías que han incrementado la productividad en el trabajo. En el caso de México estos hechos han sido muy palpables desde la época colonial hasta la fecha. Sin embargo, una de las características más notorias del desarrollo actual de la minería es el quiebre productivo entre el siglo pasado y el presente, lo que muchos analistas han llamado el bum de la megaminería. Este fenómeno donde la minería intensifica sus operaciones ha

³ Dentro de las estadísticas ambientales de México, la minería del oro, la minería de la plata, la minería del zinc y del plomo y la minería del cobre forman parte de los 38 subsectores que componen el sector metalúrgico. De acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN por sus siglas en español y NAICS por sus siglas en inglés), la minería del oro, la minería de la plata, la minería del zinc y plomo, y la minería del cobre posee los números SCIAN 212221, 212222, 212232 y 212231 respectivamente (INEGI, s/f; United States Census Bureau, 2018).

⁴ Para fines de esta tesis, la minería es catalogada como un subsector del sector metalúrgico, aunque en ocasiones se le denomine sector.

sido alentado por el desarrollo de políticas neoliberales que han encadenado las actividades productivas a nivel mundial, el aumento de la demanda mundial de metales por países como China, y el aumento de los precios de los metales.

Una de las vías que los países Latinoamericanos adoptaron para atraer inversión extranjera en la minería fue la modificación de las legislaciones para considerar de interés público el desarrollo de esta actividad, consecuentemente, esto ha obligado a los gobiernos a ofrecer muchas facilidades para acceder a los recursos minerales. En general, se ha permitido que las empresas mineras exploten nuevos yacimientos minerales, que amplíen y tecnifiquen los ya existentes, y que diversifiquen la variedad de minerales explotados (Sánchez-Albavera & Lardé, 2006, pp. 12 y 23). Si bien es cierto que las ventajas naturales son importantes, cuando se trata de atraer inversión extranjera, estas no son suficientes. Es necesario que el país receptor posea estabilidad y políticas gubernamentales que disminuyan los costos de operación de las empresas. En resumidas cuentas, son estas políticas las que acrecientan las ventajas competitivas naturales (Sánchez-Albavera & Lardé, 2006, p. 44).

En el caso de México, la inversión extranjera siempre ha estado presente en la minería. Sin embargo, este fenómeno se acentuó después de la apertura de la economía nacional a las políticas neoliberales. Dichas políticas iniciaron después de que diversos desequilibrios económicos obligaron a México a suscribir una segunda “Carta de Intención” o “Convenio de Facilidad Amplia” con el Fondo Monetario Internacional (FMI) a finales de noviembre de 1982.⁵ Esta carta tenía como propósito obtener el apoyo de este organismo para la adquisición de créditos urgentes frente a emergencias financieras (Ortiz, 1994, pp. 47 y 50). En ella se exponen las políticas sobre las cuales México ha sustentado su economía durante las últimas décadas, y que han dado pie a la apertura y liberalización comercial, al ingreso al Acuerdo General sobre Comercio y Aranceles (GATT) (1986), a la firma del Tratado de Libre Comercio (TLC) (1993) (sustituido por el nuevo acuerdo comercial entre México,

⁵ La primera “Carta de intención” fue firmada en el gobierno de José López Portillo (1976-1982).

Canadá y Estados Unidos (T-MEC) en el año 2019) y a la desprotección a la industria nacional (Ortiz, 1994, p. 53).

Las bases jurídicas que hasta la fecha han permitido la entrada de las empresas transnacionales al país fueron promulgadas en el sexenio del ex presidente Salinas de Gortari (1988-1994). La legislación fue desarrollándose a la par que se implementaron las políticas neoliberales y, en general, se caracteriza entre otras cuestiones por: dismantelar las políticas iniciadas en los años cuarenta; proteger los intereses de empresas extranjeras sobre la propiedad nacional; reproducir los modelos de justicia anglosajones; centralizar muchas competencias designadas en la Constitución y en las leyes en el Poder Ejecutivo, para permitir que las empresas negocien con mayor facilidad con el Estado; y aprobar tratados sin un referéndum de por medio (Cárdenas Gracia, 2015, p. 37).

Los marcos jurídicos neoliberales en la minería han permitido la venta de empresas mineras paraestatales, la desincorporación de reservas minerales, la desregulación del ejido y la eliminación de los límites de concesión. Existen otros aspectos poco referenciados que también han apoyado el ingreso de las empresas transnacionales como la apertura a la información geológica nacional, las subastas de recursos minerales, las licitaciones de yacimientos con reservas mineras probadas por el SGM, el concesionamiento del subsuelo a pesar de la existencia de ciudades enteras en la superficie, y el cumplimiento de regulaciones ambientales desfasadas de los nuevos desarrollos tecnológicos.

La legislación ambiental al igual que la minera se transformó desde el inicio del periodo neoliberal. En gran parte de la historia de México como nación siempre hubo regulaciones ambientales que se ajustaron al nivel de desarrollo de las fuerzas productivas y a los conflictos sociales del momento. Sin embargo, después de los noventa, las pausas legislativas son dictadas en gran medida por los convenios y tratados, y los principios base de las Conferencias Mundiales sobre el Medio Ambiente. Por su parte, el Poder Legislativo y el Ejecutivo generan los mecanismos para hacerlas cumplir a través de los distintos niveles de gobierno. De manera general, la aplicación de leyes y reglamentos ambientales que hasta ahora sigue México tiene su influencia en el artículo 5 del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN) (DOF, 1993b).

La base del sistema jurídico, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2019) se caracteriza por estar a la vanguardia de diversos temas como el derecho a un medio ambiente sano, el uso sustentable de los recursos hídricos (DOF, 2019e, p. 10, art. 4), el desarrollo industrial sustentable, o el desarrollo sustentable en general (DOF, 2019e, p. 27, art. 25). Empero, estos principios sólo han permanecido en la cima, casi no han sido llevados a la práctica. Uno de los ejemplos más sonados se encuentra en las demandas interpuestas para resarcir el daño provocado por el derrame de sulfato de cobre acidulado por la empresa Grupo México. Ninguna de estas demandas hizo alusión a la garantía correlativa del artículo 4 constitucional que dice: “el daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley” (DOF, 2019e, p. 10 art. 4) (Ibarra Barreras & Moreno Vázquez, 2017, pp. 142–143).

Son pocos los escenarios nacionales donde se cuestiona la pertinencia de las disposiciones normativas en la protección del ambiente. Usualmente, la legislación sólo ha sido vista como un conjunto de normas a las cuales las diversas actividades productivas deben apegarse. Empero, no se percibe que existen contradicciones cuando se trata de ajustar la legislación a las tendencias tecnológicas y económicas. Estas contradicciones son aprovechadas por las empresas mineras para disminuir sus costos operativos. Las nuevas tecnologías deberían formar parte de la base material para la puesta en marcha de las regulaciones ambientales, sin embargo, en la realidad no sucede así.

Bajo las nuevas tecnologías procedentes de la tercera y la cuarta revolución industrial, las políticas gubernamentales son el principal obstáculo para decidir instalarse en un país. Pues los avances tecnológicos han hecho redituables los yacimientos de baja calidad. Una prueba de ello se encuentra en las encuestas del Instituto Fraser que establecen el nivel de atracción minera para diversos países considerando diversos aspectos entre ellos sus marcos regulatorios. El último informe situó a México como el tercer país más atractivo para la minería en América Latina después de Chile y Perú (Fraser Institute, 2019). En general, los países con mayor atracción minera son aquellos que facilitan la acumulación de capital a través de la externalización de los efectos de la degradación del ambiente.

Por otro lado, aunque poco se habla de ello, el patrón oro continua vigente. Una de las consecuencias de la guerra comercial entre Estados Unidos y China ha sido la compra desmedida de este metal. Varios países incluyendo a Rusia y China han tratado de alejarse de la economía estadounidense cimentada en el dólar y en los bonos del tesoro, a través de la compra de oro (Oroinformación, 2019). Las bajas concentraciones de este metal en la corteza terrestre han hecho que la producción de una onza de este metal involucre una mayor degradación del ambiente.

Este tema de investigación fue elegido debido a la importancia de los metales en el desarrollo tecnológico, pero sobre todo porque existe preocupación mundial por el aumento de los impactos ambientales y los conflictos sociales en esta actividad industrial. El salto cualitativo y cuantitativo que ha dado la minería para procesar mayor cantidad y variedad de minerales ha contribuido a degradar el ambiente. La degradación ambiental es un fenómeno que se origina cuando se depredan o sobreexplotan los recursos naturales y se contaminan los ecosistemas (EEA, 2019). La depredación y la contaminación ambiental son fenómenos que se desarrollan cuando se intensifican los procesos industriales. La depredación surge cuando se explotan los recursos naturales más allá de su reproducción natural. Por su parte, la contaminación aparece cuando la cantidad de sustancias químicas emitidas al ambiente supera la capacidad de degradación natural (Foladori, 2005, p. 16).

En la minería la degradación ambiental se ha acrecentado desde principios de siglo con la intensificación de la producción de metales y el aumento de los proyectos mineros en fase de producción. Según el SGM, estos pasaron de 71 a 107 durante el periodo 2010-2017, es decir, se incrementaron casi un 34 % (2011, p. 21, 2012, p. 20, 2013, p. 19, 2014, p. 18, 2015, p. 19, 2016, p. 20, 2017, p. 20, 2018, p. 20). Este comportamiento supone que las explotaciones se realizan cada vez más sobre yacimientos de fertilidad decreciente y con minerales de mayor complejidad. Esto obliga a: i) remover mayor cantidad de material rocoso por unidad de metal; ii) utilizar mayor cantidad de energía eléctrica, combustibles, agua y otros insumos; y iii) verter mayores cantidades de desechos de roca y sustancias químicas al ambiente.

Para dimensionar las cantidades de residuos mineros que se disponen en el ambiente, se mencionan algunos ejemplos de los contenidos metálicos en los yacimientos. En el tema del oro, un grupo de investigadores que trabajaron con el yacimiento de oro y cobre de Ixhuatán, Chiapas, llegaron a encontrar muestras de hasta 6 ppm (gramos por tonelada) de este metal (Miranda Gasca, 2018). Este caso es un ejemplo actual de una mina rica en oro, yacimientos menos fructíferos llegan a tener concentraciones de menos de un gramo por tonelada y, aun así, se siguen considerando económicamente viables. En el caso de metales como el plomo, zinc y cobre, sus concentraciones generalmente son medidas en porcentaje en peso por tonelada. Por ejemplo, Peñoles en su informe anual 2017 reportó que la mina Velardeña ubicada en el municipio de Cuencamé, Durango, procesó 2 107 000 toneladas de mineral, de las cuales, el 3.83 % correspondía al zinc (Peñoles, 2018, p. 32).

Respecto a los contaminantes emitidos a la atmósfera, las estadísticas del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) del 2017 no presentan datos específicos de la cantidad de gases efecto invernadero (GEI) que emite la minería del oro, de la plata, del plomo, del zinc o del cobre. Sin embargo, en este inventario se tienen dos rubros relacionados con la minería objeto de estudio: “minería (con excepción de combustibles) y cantería” y “metales no ferrosos”, los cuales muestran una tendencia al alza en la emisión de CO₂-e (bióxido de carbono equivalente) durante las dos primeras décadas del siglo XXI. Por ejemplo, la minería (con excepción de combustibles) y cantería aumento sus emisiones de CO₂-e en un 46 % durante el periodo 2000 – 2017, en tanto que las empresas pertenecientes al grupo de metales no ferrosos también aumentaron un 13.5 % sus emisiones durante ese mismo periodo (INECC, 2018c). Esto corrobora un aumento de la producción de metales durante este siglo y una mayor degradación ambiental por el aumento en la emisión de GEI.

Esta investigación se organiza en siete capítulos, un apartado de anexos y otro de referencias, cuyo contenido se explica a continuación. En el primer capítulo se desarrolla un estudio bibliométrico para establecer hasta qué grado se ha estudiado a la minería a nivel internacional desde sus diversas aristas. Este estudio se realizó con el programa VOSviewer versión 1.6.15 (van Eck & Waltman, 2010) y con la metodología señalada por varios autores

(López-Robles et al., 2018, 2020; López-Robles, Otegi-Olaso, Gamboa-Rosales, et al., 2019; López-Robles, Otegi-Olaso, Porto-Gómez, et al., 2019). En el segundo capítulo se analizan los principales elementos teórico-conceptuales que guían esta investigación. Este análisis es visto desde la corriente crítica marxista que considera las relaciones de producción y el desarrollo de las fuerzas productivas como los principales elementos que definen las características de una época histórica dada. La interacción de estos elementos explica, en buena medida, aunque no exclusivamente, el nivel de degradación ambiental, el nivel de desarrollo de las legislaciones jurídicas, y los cambios tecnológicos, tres temas que aborda esta investigación.

En el capítulo tercero se presenta el contexto de estudio de la actividad minera en dos apartados. En el primero se realiza una descripción de las etapas de desarrollo neoliberal en México y su relación con la minería; y en el segundo se analiza el escenario mundial y nacional de la producción minera de metales objeto de estudio de la presente investigación. En el cuarto capítulo se muestra cual ha sido el desarrollo tecnológico en la minería en dos apartados. En el primero se realiza una breve descripción de la evolución histórica de la tecnología en la minería de México; y en el segundo se analizan las nuevas tecnologías que esta actividad ha adoptado durante las últimas dos décadas, así como sus alcances en el proceso, en el medio socioeconómico y en el ambiente. En el capítulo quinto se analiza en siete apartados, cómo ha evolucionado la legislación ambiental en México, cuales han sido los problemas de su aplicación y cómo ha contribuido a aumentar la degradación ambiental en la actividad minera.

El capítulo sexto dimensiona el estatus de la degradación ambiental en la minería en dos apartados. En el primero se realiza un análisis de los procesos mineros más comunes y su interacción con el ambiente; y en el segundo se analizan los contaminantes emitidos y transferidos por la minería en México, según datos del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). A la par en este último apartado se realizan algunas comparaciones entre los registros de México, Canadá y Estados Unidos. Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones finales.

A.1 El objeto de estudio y su dimensión

Para dimensionar el universo de estudio, primeramente se menciona que México es uno de los principales países productores de metales a nivel mundial, ocupa el primer lugar en producción de plata, el quinto en plomo, el sexto en zinc, el octavo en oro, y el noveno en cobre (CAMIMEX, 2019b, pp. 36, 40, 44, 47 y 50). El cuadro siguiente resume la producción de estos metales durante el 2018, donde se observa que la gran minería ha desplazado casi en su totalidad a las pequeñas y medianas empresas. Los procesos mineros desarrollados por la gran minería producen más del 93 % del oro, plata, plomo, zinc y cobre en México.

Cuadro 1 Producción de oro, plata, plomo y zinc por la gran minería en México durante 2018

Metal	Producción total (toneladas)	Producción por la gran minería (toneladas)	Porcentaje del total
Oro	141 140.00	137 370.00	97.33
Plata	7 243 250.00	6 896 280.00	95.91
Plomo	230 869.36	215 787.46	93.47
Zinc	661 903.38	638 151.44	96.41
Cobre	677 161.15	663 760.95	98.02

Fuente: elaboración propia con datos de SGM (2019a, p. 20).

La legislación minera clasifica como pequeña y mediana minería a las empresas que explotan entre 15 y 70 mil toneladas de mineral por mes (DOF, 2014e, p. 5 art. 9). En ese entendido, la gran minería explota más de 70 mil toneladas por mes, o más de 2 333 toneladas por día. Esta magnitud de explotación y procesamiento de mineral muestra un panorama inicial de la capacidad técnica que poseen las empresas en estudio.

La gran minería se desarrolla en empresas de capital nacional y extranjero. Información proporcionada por la Secretaría de Economía (SE) menciona que para el año 2018 se tenían 116 proyectos operados por once empresas de capital nacional y el Servicio Geológico Mexicano (SGM), de los cuales 61 se encontraban en fase de exploración, 43 en producción, 10 en postergación y 2 en cierre. El cuadro siguiente presenta un resumen de dichos proyectos.

Cuadro 2 Proyectos mineros operados por empresas de capital nacional

Empresa / Institución	Proyectos totales	Proyectos en producción	Proyectos que manifiestan extraer oro, plata, plomo, zinc o cobre
Compañía Minera Autlan S.A.B. de C.V.	6	6	0
Compañía Occidental Mexicana S.A. de C.V.	1	1	0
Fresnillo PLC	27	6	6
Grupo Acerero del Norte S.A. de C.V.	8	8	3
Grupo México S.A.B. de C.V.	14	5	5
Metallorum Holding S.A.P.I. de C.V.	20	0	0
Minera Frisco	9	9	9
Servicio Geológico Mexicano	15	0	0
SOMIN S.A.P.I. de C.V.	1	1	0
Antracita de Sonora S.A. de C.V.	1	1	0
Industrias Peñoles S.A.B. de C.V.	13	5	5
Minas de Río Tinto S.A. de C.V.	1	1	1
Totales	116	43	29

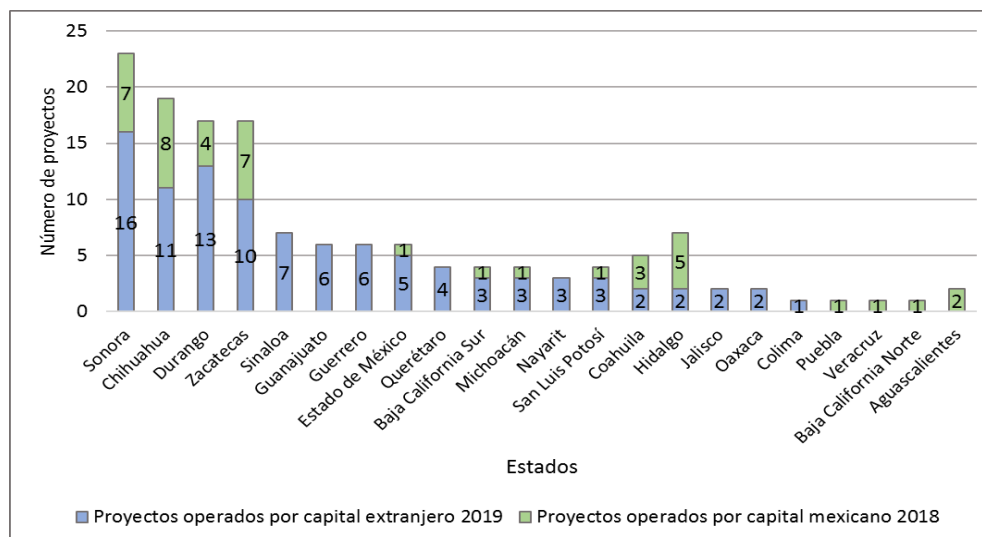
Fuente: elaboración propia con datos SE (2018).

El SGM en su página Sistema Integral sobre Economía Minera (SINEM) menciona que los proyectos mineros operados por empresas extranjeras eran 1189 hasta principios del 2019, de los cuales 596 se encontraban en exploración, 99 en producción, 50 en desarrollo, 439 en postergación y 5 en cierre (SGM, 2019b). Los 99 proyectos en producción pertenecían a 67 empresas o asociaciones de empresas, en el anexo 2 se presentan los detalles proporcionados por la página en cuestión.

Como se observa en este anexo, los países con mayor número de proyectos en producción en México son Canadá con 61 y Estados Unidos con 16. Si se considera que existen un total de 142 en esta etapa (43 nacionales y 99 extranjeros), estos dos países participan en la operación del 54 % de ellos, en tanto que las empresas de capital nacional operan el 30 %, y el 4 % en asociación con otros países. Si se clasifican estos proyectos por tipo de metal producido, aproximadamente el 75 % manifiesta extraer oro, plata, plomo, zinc o cobre como sus principales productos. De igual manera, si se distribuyen estos proyectos por estado, se concluye que Sonora, Chihuahua, Durango y Zacatecas tienen el

mayor número de ellos con 23, 19, 17 y 17 respectivamente. La gráfica siguiente muestra un resumen de los proyectos mineros en etapa productiva por estado.⁶

Gráfica 1 Proyectos mineros en etapa productiva por estado en México



Fuente: elaboración propia con datos de SGM (2019b) y SE (2018).

Como se muestra en las estadísticas anteriores, los procesos mineros desarrollados por la gran minería en etapa de producción superan los 100. En un primer momento este sería el universo de estudio de la presente investigación, no obstante, como se mencionó en un inicio, no se estudia los procesos mineros donde el cobre es el principal producto. En general se enfatiza en los procesos de lixiviación de oro y plata en pilas y en los procesos de flotación selectiva de las minas polimetálicas. Se estudian los procesos mineros de la gran minería de todos los estados de México, pero en especial los de Zacatecas por las razones mencionadas en un inicio.

A.2 Pregunta de investigación

Considerando que la producción de metales se ha intensificado desde principios del siglo XXI, y que este escenario ha enfrentado a la minería a: i) explotar yacimientos con bajas concentraciones de metales y con minerales de mayor complejidad; ii) consumir mayores

⁶ No todos los proyectos mineros poseen una superficie de concesión semejante, aunque se ubique dentro de la gran minería.

cantidades de agua, de energía y de sustancias químicas; y iii) degradar en mayor medida al ambiente, a través de la modificación de los patrones ecológicos naturales y la emisión de mayores cantidades de residuos. La presente investigación se guía por la siguiente interrogante: ¿cómo los nuevos avances tecnológicos y la legislación ambiental han contribuido a aumentar la degradación ambiental generada por la minería de México?

A.3 Objetivos

En sincronía con la pregunta de investigación, el objetivo principal de esta investigación es analizar cómo los nuevos avances tecnológicos y la legislación ambiental han contribuido a aumentar la degradación ambiental generada por la minería de México durante las dos primeras décadas del siglo XXI. Para cumplir con este objetivo general, se desarrollaron los objetivos específicos siguientes:

- 1) Analizar las nuevas tecnologías adoptadas por la minería durante las últimas dos décadas y sus alcances en el proceso, en el medio socioeconómico y en el ambiente.
- 2) Analizar la legislación ambiental minera y sus alcances para regular la degradación en el ambiente desde dos perspectivas: i) el avance tecnológico, y ii) el principio de precaución, uno de los principales elementos de la teoría práctica de la sustentabilidad.
- 3) Analizar los proyectos mineros en fase productiva y su interacción con el ambiente. Este objetivo se complementa con una comparación de los registros de emisiones y transferencia de contaminantes de los países firmantes del TLC.

A.4 Hipótesis

El desarrollo tecnológico propiciado por las dos últimas revoluciones industriales, enfocado en la explotación y procesamiento de grandes cantidades de minerales con bajas concentraciones de metales, junto a una legislación ambiental desfasada de estos nuevos avances, han contribuido a aumentar la degradación del ambiente generada por la minería de México.

A.5 Estrategia metodológica

La presente tesis es una investigación de tipo mixta que analiza aspectos históricos y estructurales de la minería, así como datos cuantitativos y cualitativos procedentes de entrevistas y de ámbitos gubernamentales, académicos y comerciales. En el anexo 2 se presenta una reseña de los principales eventos mineros a los que se asistió con el fin de consolidar una base de información sólida para su análisis.

Bajo esta perspectiva, en la primera parte de la investigación en el capítulo 1 se realizó un estudio bibliométrico utilizando el programa VOSviewer versión 1.6.15 (van Eck & Waltman, 2010) para determinar hasta qué grado se ha estudiado a la minería. Los pasos desarrollados fueron: i) recuperación y procesamiento de datos; ii) elaboración y normalización de los mapas científicos; y iii) visualización y análisis de las principales relaciones en las líneas de investigación. Posteriormente en el capítulo 2 se analizaron los principales elementos teórico-conceptuales de la investigación, y en el capítulo 3 se analizó su contexto histórico.

En la segunda parte de la investigación, en el capítulo 4 se analizaron las tecnologías que la minería adoptó de las dos últimas revoluciones industriales, y sus alcances en el proceso, el medio socioeconómico y el ambiente. Para desarrollar este capítulo se asistió a diversos eventos mineros como la Reunión Internacional de Minería 2018 y la Convención Internacional Minera 2019, donde se expusieron los últimos avances tecnológicos. En estos eventos se desarrollaron entrevistas semiestructuradas a proveedores, quienes proporcionaron información relevante sobre los nuevos avances tecnológicos en esta rama industrial. Posteriormente, se desarrollaron entrevistas semiestructuradas a personal operativo de las empresas, con el propósito de investigar qué tipo de tecnologías han sido adoptadas por la gran minería, y cuales han sido sus alcances en el proceso y en el ambiente. A la par, también se visitaron algunas minas importantes para constatar la información proporcionada en las entrevistas. Finalmente, se revisaron artículos científicos y académicos e información estadística de la minería para completar el análisis de la información recopilada en los puntos anteriores.

En la tercera parte de la investigación en el capítulo 5 se analizó la legislación ambiental minera y sus alcances para regular la degradación del ambiente desde el avance tecnológico y el principio de precaución.⁷ Para entender con mayor profundidad la estructura jurídica de México, en el apartado 5.1 se analizó el contexto bajo el cual la legislación ambiental se desarrolló, y los problemas que se derivan de su aplicación. Para realizar esta actividad, se analizaron artículos académicos y documentos jurídicos archivados en el Diario Oficial de la Federación (DOF), así como, informes de organismos como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Este apartado se complementó con entrevistas semiestructuradas al personal administrativo de las diferentes dependencias involucradas en coordinar la política ambiental del país.

En los apartados 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 se identificaron las disposiciones jurídicas ambientales que regulan a la minería. Además, se analizó si estas disposiciones son suficientes para prevenir y controlar la degradación ambiental, considerando que existe un nuevo entorno tecnológico que puede magnificar los impactos ambientales o facilitar su prevención y control. Esta actividad se logró, a través de entrevistas semiestructuradas a expertos en la materia y personal administrativo de las dependencias. Para apoyar esta actividad, se realizó una estancia en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) de Saltillo, Coahuila, en el área de metalurgia. Asimismo, se asistió a un evento minero de gran trascendencia, el V Seminario sobre Depósito de Jales (2019), donde se discutió la pertinencia de la legislación actual en la materia.

Posteriormente, en el apartado 5.7 se determinó que elemento prioriza la legislación para lograr la sustentabilidad ambiental, el análisis de riesgo o el principio de precaución. Para ello, se analizó minuciosamente cada disposición legal aplicable a la minería y se determinó su naturaleza normativa de acuerdo a estos dos instrumentos legales.

En la cuarta parte de la investigación en el capítulo 6 apartado 6.1 se realizó un recuento de los impactos ambientales que generan los procesos mineros, y se analizaron

⁷ La legislación ambiental mexicana más actualizada se encuentra disponible en: www.diputados.gob.mx

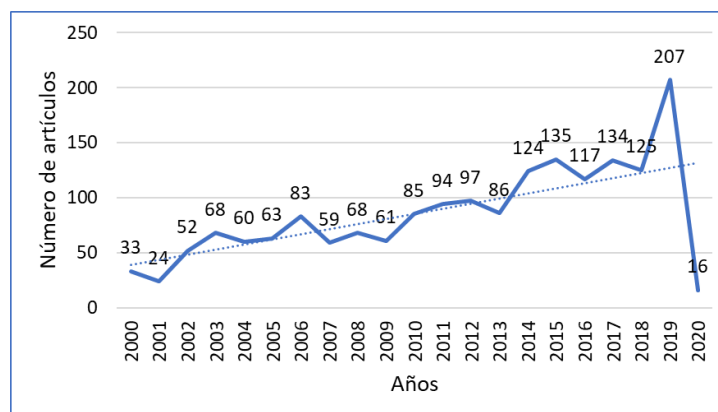
sus estadísticas ambientales. Las fuentes de información que se utilizaron para desarrollar esta parte de la investigación fueron: las manifestaciones de impacto ambiental y los estudios de análisis de riesgo proporcionados por el Sistema Nacional de Trámites (SINAT), las estadísticas ambientales de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y los instrumentos legislativos con carácter público como la Cédula de Operación Anual (COA), el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) y el Registro Nacional de Emisiones (RENE). Finalmente, en el apartado 6.2 se realizó un análisis comparativo entre los registros de emisiones y transferencia de contaminantes de México, Canadá y Estados Unidos.

CAPÍTULO 1 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LA MINERÍA DEL SIGLO XXI

Para establecer hasta qué grado se ha estudiado a la minería a nivel internacional desde sus diversas aristas, se realizó un estudio bibliométrico utilizando el programa VOSviewer versión 1.6.15 (van Eck & Waltman, 2010). La metodología sugerida por varios autores dio como resultado dos mapas científicos o mapas de concurrencia en base a palabras claves definidas, las cuales son reconocidas como líneas de investigación (López-Robles et al., 2018, 2020; López-Robles, Otegi-Olaso, Gamboa-Rosales, et al., 2019; López-Robles, Otegi-Olaso, Porto-Gómez, et al., 2019). Los pasos desarrollados fueron: i) recuperación y procesamiento de datos; ii) elaboración y normalización de los mapas científicos; y iii) visualización y análisis de las principales relaciones en las líneas de investigación. El análisis bibliométrico y los mapas científicos se desarrollaron utilizando 1 791 documentos sobre minería disponibles en la base de datos de *Scopus* durante el periodo 2000-2020, la fecha de recopilación de la información fue el 8 de febrero de 2020.

La gráfica siguiente muestra la cantidad de documentos que han sido publicados sobre minería en la base de datos de *Scopus* durante el periodo 2000 - 2020. Como se observa, existe una tendencia al alza, obviando el 2020 donde comenzó esta investigación. De los 1 791 documentos publicados, 1 150 son artículos, 493 conferencias y 148 revisiones.

Gráfica 2 Documentos publicados sobre minería en la base de datos de *Scopus* 2000-2020



Fuente: elaboración propia con datos de VOSviewer versión 1.6.15.

En este tenor, los autores que publicaron más de cinco documentos sobre minería fueron: Hilson G. (16), Kemp D. (13), Mudd G. M. (10), Benzaazoua M. (8), Morkun V. (8),

Owen J. R. (8), Ralston J.C. (8), Moran C.J. (7), Hitch M. (6), Reid D.C. (6), Tron V. (6), Veiga M. (6), y Zlotnikov D. (6). Por su parte, las instituciones que apoyaron la investigación de más de diez documentos en el mismo tema fueron: National Natural Science Foundation of China (43), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (13), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (13) y Social Sciences and Humanities Research Council of Canada (11). Por último, las fuentes de divulgación que publicaron más de 30 documentos fueron: Resources Policy (94), Journal Of Cleaner Production (79), CIM Magazine (48), Mining Engineering (34), Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy (32).

El cuadro siguiente muestra los países que publicaron más documentos sobre minería. Como se observa a la vanguardia se encuentra Australia, Canadá y Estados Unidos, tres de los países desarrollados líderes en producción de metales, y también China, un país emergente también líder en esta área (BMNT, 2019, p. 34). En el caso de México, se publicaron 12 documentos en la base de *Scopus* durante el periodo analizado.

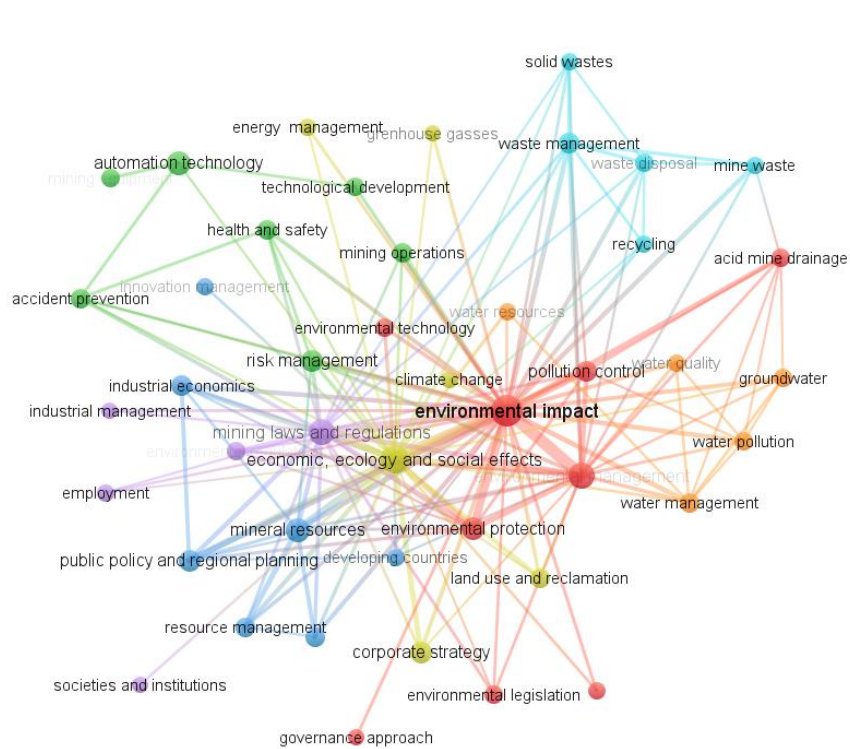
Cuadro 3 Documentos publicados sobre minería en la base de datos de *Scopus* por país
2000-2020

País	Número de publicaciones	País	Número de publicaciones
Australia	233	Ucrania	24
Canadá	189	Francia	23
Estados Unidos	187	Italia	22
China	148	Ghana	17
Sudáfrica	129	Países Bajos	16
Reino Unido	122	Austria	15
India	84	Irán	15
Federación Rusa	66	Japón	15
Brasil	61	Indonesia	13
Polonia	57	Republica Checa	12
Alemania	53	México	12
Chile	45	Nueva Zelanda	12
Suecia	45	Portugal	12
Rumania	39	Dinamarca	11
España	39	Malasia	11
Finlandia	29	Eslovaquia	11
Turquía	24		

Fuente: elaboración propia con datos de VOSviewer versión 1.6.15.

El primer mapa muestra los grupos de investigación por colores sobre los cuales se ha investigado durante las dos últimas décadas. Por ejemplo, el más predominante es el denominado Impacto y gestión ambiental, el cual aparece en color rojo. De este mapa se deduce que las investigaciones en minería se concentran en 7 grupos, los cuales engloban 44 líneas de investigación. En el anexo 3 se presenta un resumen de los resultados proporcionados por el software VOSviewer versión 1.6.15. Es importante mencionar que el número total de ocurrencias de las líneas de investigación mencionadas en este anexo, no corresponde con el número de documentos publicados, debido a que un documento puede estar inmerso en una o más líneas de investigación.

Figura 1 Mapa científico 1, grupos de investigación en la minería 2000-2020



Fuente: software VOSviewer versión 1.6.15.

Los grupos de investigación ordenados de acuerdo con el número de ocurrencias llevan por nombre: i) Impacto y gestión ambiental; ii) Sociedad, economía y cambio climático; iii) Tecnología y seguridad; iv) Gestión de los recursos minerales; v) Legislación minera; vi) Manejo de residuos; y vii) Manejo del agua. En el segundo mapa se presentan las 44 líneas de investigación con un volumen proporcional al número de artículos y coloreadas según el inicio de las publicaciones durante el periodo señalado. Por ejemplo, la línea de Impacto ambiental inició a consolidarse desde el 2011, en tanto que línea de Cambio climático por su coloración es más reciente. Visto de manera global este mapa científico es un mapa lógico, de algunos temas se desprenden otros más recientes. Por ejemplo, después de iniciarse a publicar sobre los efectos económicos, ecológicos y sociales de la minería, se comenzó a publicar sobre las estrategias corporativas que las empresas mineras han adoptado para enfrentar dichos efectos.

cuidado del ambiente a reivindicar que la protección del ambiente y el desarrollo son igual de importantes (MINEO Consortium, 2000, p. 3).

Dentro de este grupo también se han desarrollado otras líneas de investigación en pro de mitigar los impactos ambientales provocados por la minería, dentro de las cuales se encuentran: Gestión ambiental (213), Protección del ambiente (119) y Control de la contaminación (77). En este sentido, un sinnúmero de herramientas y de metodologías han sido desarrolladas para apoyar una gestión ambiental más sólida, dentro de las que se encuentran: la evaluación del impacto ambiental (EIA), la evaluación de los riesgos ecológicos (ERA), el análisis del flujo del material (MFA), la intensidad de materiales por unidad de servicio (MIPS), el análisis de costo-beneficio (CBA) y la evaluación del ciclo de vida (LCA) (Norgate et al., 2007, p. 839).

El segundo grupo referido a Sociedad, economía y cambio climático, se compone de 6 líneas de investigación, siendo la principal: Efectos económicos, ecológicos y sociales de la minería con 314 ocurrencias. Como se observa en los mapas científicos y en el anexo 3, este segundo grupo amplía el estudio de los efectos de la minería hacia el aspecto social y económico. Después, se enfoca hacia la gestión energética y la subsecuente reducción de los efectos del cambio climático. Diversos investigadores han escrito sobre estos temas (Hresc et al., 2018; Mactaggart et al., 2016; Odell et al., 2018; Suopajärvi & Kantola, 2020; Tost et al., 2020).

La adición del factor intensidad a la producción minera durante las últimas décadas ha aumentado los insumos y residuos de esta actividad. En consecuencia, el consumo de combustibles también se ha exacerbado al igual que la emisión de gases efecto invernadero. Como consecuencia del inicio de las políticas de bonos de carbono para reducir la contaminación ambiental, la minería ha comenzado a incorporar una mayor cantidad de energía procedente de fuentes renovables (Mudd, 2010, p. 113). Esta nueva estrategia y otras adoptadas por esta rama, se reflejan en la línea de investigación denominada Estrategias corporativas (87).

El tercer grupo más investigado es el de Tecnología y seguridad. La principal línea de investigación de este grupo es Tecnología de automatización con 145 ocurrencias. Un aspecto esperado dentro de la minería dado el aumento de las tasas de producción de metales metálicos desde principios del siglo XXI. Tal es el caso del oro cuya producción mundial pasó de 2 794 a 3 503 toneladas del 2010 al 2018 (Metals Focus, 2019, p. 6). Diversos autores han escrito sobre las nuevas tecnologías en la minería (Bergh, 2011; Erbe et al., 2004; J. Li & Zhan, 2018a; Osman & Ghiran, 2019; Ralston et al., 2014).

Si bien la minería no es la principal actividad industrial ícono de Industria 4.0, las grandes empresas mineras de todo el mundo han adoptado gran parte de los avances de la tercera y la cuarta revolución industrial. Tras esta principal línea y en la misma dirección, existen investigaciones sobre Operaciones mineras (56), Desarrollo de equipos mineros (46) y Desarrollo tecnológico (43). En la actualidad, es posible ver ejemplos de empresas que han incorporado estos nuevos avances en sus operaciones, como la mina Borden Gold propiedad de Newmont Goldcorp Corporation que se ubica en Ontario, Canadá, la cual cuenta con tecnologías que dirigen digitalmente los procesos mineros, y con vehículos de energía baja en carbono (Minería en línea, 2019a).

Paulatinamente dentro de este mismo grupo existe un área de suma importancia dentro de la minería, la seguridad. Un aspecto que se ha beneficiado del desarrollo de nuevas tecnologías. En ausencia de procesos automatizados, las minas subterráneas presentan muchos peligros operacionales como caídas y exposición a polvos. Desde esta perspectiva, la principal línea de investigación desarrollada es el Manejo del riesgo en las instalaciones mineras (83), seguida por la Prevención de accidentes (60) y la de Salud y seguridad (48).

El cuarto grupo denominado Gestión de los recursos minerales, se encuentra muy relacionado con el dimensionamiento de las reservas mineras a nivel mundial, su exploración y explotación, así como las políticas públicas y de planificación regional que sustentan diversos países entorno a esta actividad. De las siete líneas de investigación que sustentan este grupo, la más prominente es Recursos minerales con 135 ocurrencias. Diversos autores han escrito sobre este tema y sus implicaciones (Dou et al., 2020;

Henckens et al., 2016, 2018; Kanazawa & Kamitani, 2006; Watzel et al., 2020; Xi et al., 2020).

Dentro del quinto grupo denominado legislación minera, la línea de investigación más significativa es: Leyes y regulaciones mineras (217), seguida por Regulaciones ambientales (39). El estudio de las legislaciones mineras es un tema que ha llamado la atención de diversos investigadores debido al acaparamiento de los recursos minerales y al aumento de los conflictos entre las empresas y las comunidades aledañas a las unidades mineras. Estos hechos forman parte de las causas que han propiciado que diversos autores investiguen las legislaciones mineras del mundo y sus contradicciones (Jartti et al., 2020; Losekann et al., 2020; Tiess & Ruban, 2013; Vélez-Torres, 2014), y también el estatus de las licencias sociales (Nyembo & Lees, 2020; Santiago et al., 2021).

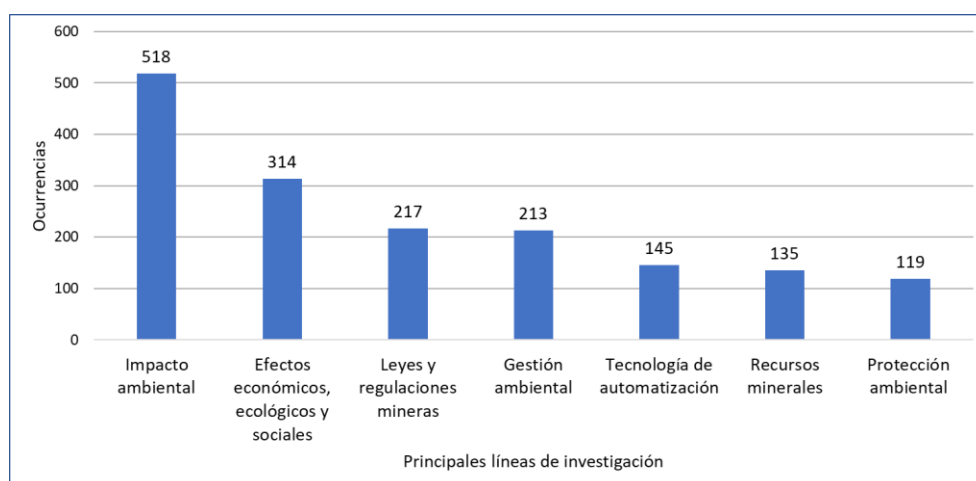
Los dos últimos grupos engloban líneas de investigación que investigan con detalle dos de los impactos ambientales de mayor significancia desarrollados durante la operación de una mina. El sexto grupo denominado Manejo de residuos incluye cinco líneas de investigación dentro de las cuales resalta la Gestión de los residuos en la minería, siendo los jales el residuo minero más importante. Un material rocoso particulado procedente de los procesos de lixiviación y flotación que tiene la posibilidad de generar drenaje ácido de mina. Un líquido que debido a su gran acidez y alto contenido de metales tóxicos y sulfatos puede generar serios problemas en el ambiente (Kefeni et al., 2017, p. 475). Diversos autores han escrito sobre el manejo de residuos mineros y su dispersión en el ambiente (Akcil & Koldas, 2006; Kefeni et al., 2017; Ritcey, 2005; Rodríguez et al., 2009; Zagury et al., 2004).

El último grupo engloba otro de los impactos ambientales más controversiales de la minería. La línea de investigación más prominente es la Gestión del agua con 51 ocurrencias. El gran consumo de agua por la minería es uno de los temas más sensibles de la actualidad. Autores como Li *et al.* comentan que a medida que los problemas por falta de agua se agudizan, el reciclaje de agua en la flotación se convierte en una de las principales opciones para reducir la extracción subterránea de agua, no es la única opción, existen otras, en todo caso les compete a las empresas mineras elegir la opción menos perjudicial para el ambiente. Este panorama obliga a las empresas mineras a adoptar sistemas de

tratamiento de agua para mitigar el consumo de agua dulce, así como explorar nuevas tecnologías para la flotación que empleen menos cantidad de este vital líquido (2019, p. 395). En esta dirección existen diversas investigaciones enfocadas a determinar los efectos de la calidad del agua en los procesos mineros y cómo abatirlos, dados los consumos exorbitantes de este vital líquido (Levay et al., 2001; Y. Li et al., 2019; Liu et al., 2013; Mudd, 2020; Northey et al., 2016).

El cuadro siguiente presenta las líneas de investigación sobre las que más se ha escrito en el periodo analizado.

Gráfica 3 Líneas de investigación en minería con mayor número de ocurrencias (2000-2020)



Fuente: elaboración propia con datos del software VOSviewer versión 1.6.15.

En conclusión, es notable que durante las dos últimas décadas las investigaciones dirigidas hacia la minería se enfocan en buena medida en el estudio de los impactos que provoca sobre el ambiente y sus posibles soluciones. Este hallazgo sugiere que la sociedad en su conjunto ha revalorizado el papel que tienen los ecosistemas y elementos como el agua en su sobrevivencia. Si bien la minería es una actividad económica importante, en la actualidad son interminables los aspectos que se discuten en torno a su desarrollo, como los jurídicos, los tecnológicos, los ambientales, los sociales y los económicos. En gran medida esto se debe a la problemática que acarrea la apertura de una mina y al aumento de la explotación de los recursos minerales durante el presente siglo.

CAPÍTULO 2 METABOLISMO SOCIAL, LEGISLACIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

En el apartado siguiente se analizan los principales elementos teórico-conceptuales que guían la presente investigación. Este análisis se realiza desde la corriente crítica marxista, la cual considera que las relaciones de producción y el desarrollo de las fuerzas productivas son los elementos principales que definen las características de una época histórica dada. La interacción de estos elementos explica en buena medida, aunque no exclusivamente, el nivel de degradación ambiental, el nivel de desarrollo de las legislaciones jurídicas, y los cambios tecnológicos, tres temas de esta investigación.

El metabolismo del ser humano con la naturaleza o metabolismo social es un concepto que las ciencias sociales han incorporado de las ciencias naturales para explicar cómo la sociedad interrelaciona con la naturaleza externa y, cuáles son los efectos de dicho proceso. Desde el punto de vista de las ciencias naturales, este concepto abarca todos los procesos físicos y bioquímicos que los organismos realizan para transformar la materia y la energía, y desarrollar sus funciones vitales. Si bien cada ser vivo interacciona de manera diferente con la naturaleza, los ciclos biológicos comprenden: el nacimiento, el desarrollo, la reproducción y la muerte.

La diferenciación de la mano del pie y la locomoción erecta, permitieron que el ser humano se separara de sus antepasados, e iniciara la articulación del lenguaje y el desarrollo del cerebro. La mano se convirtió en la herramienta principal para desarrollar el trabajo humano (Engels [1873-1886], 1961, p. 15). Un elemento del cuerpo que a la par también se ha perfeccionado y ha llegado a ser un producto de ese trabajo. El desarrollo gradual de la mano y de la marcha erecta han repercutido en las demás partes del cuerpo, y han permitido que éste evolucione como un todo. Poco a poco el ser humano ha ampliado sus horizontes y ha descubierto nuevas propiedades o destrezas en los objetos de la naturaleza (Engels [1876], 2008, pp. 168–169).⁸

⁸ A pesar de que Engels escribió esto hace 150 años, aún se considera vigente.

El ser humano ha plasmado estas nuevas propiedades en instrumentos de trabajo. A diferencia de muchas especies que también utilizan instrumentos, el ser humano es el único ser vivo que los ha acumulado y los ha perfeccionado a través del tiempo. De hecho, la explotación actual de los minerales se realiza mediante sofisticados instrumentos que encierran conocimientos empíricos y teórico surgidos desde que el ser humano apareció en la faz de la tierra. En el capítulo 4 sobre desarrollo tecnológico se analizan los principales avances de la minería acontecidos durante las últimas décadas. Un periodo relativamente corto, no obstante, da un panorama general del avance que han tenido las últimas revoluciones industriales en esta actividad.

Esta diferencia metabólica o de comportamiento en la naturaleza es la razón principal por la cual el trabajo humano no puede ser comparado con las actividades que otros seres vivos desarrollan –aunque en muchas ocasiones se les denomina también trabajo.

Podemos distinguir al hombre de los animales por la conciencia, por la religión o por lo que se quiera. Pero el hombre mismo se diferencia de los animales a partir del momento en que comienza a producir sus medios de vida, paso éste que se halla condicionado por su organización corporal. Al producir sus medios de vida, el hombre produce indirectamente su propia vida material (Marx & Engels [1846], 1974, p. 19).

Dicho potencial de transformación que el humano ha acuñado con el tiempo repercute no sólo en su naturaleza externa, sino también en su naturaleza propia. El ser humano transforma su propia existencia al hacerse cada vez más dependiente de los objetos que produce.

El intercambio orgánico tiene como contenido el hecho de que la naturaleza se humaniza y el hombre se naturaliza. Su forma está históricamente determinada en cada caso. La fuerza de trabajo, aquella “sustancia natural transformada en el organismo humano”, se ejerce sobre sustancias naturales exteriores al hombre; la naturaleza se transforma juntamente con la naturaleza. (Schmidt, 1977, pp. 85–86).

Los trabajadores de las minas, que hasta hace dos o tres décadas tenían conocimientos empíricos sobre la química de los minerales, la cuantificación de reservas, y las barrenaciones, los han perdido al ser incorporados a una serie de sofisticados instrumentos, como se muestra en el capítulo 4. Los nuevos instrumentos de trabajo han incorporado el conocimiento histórico del ser humano.

Los objetos sobre los cuales actúa el ser humano son parte de la misma naturaleza donde él se desarrolla. Estos objetos se encuentran sometidos a las mismas leyes físicas y químicas de la naturaleza, las cuales el ser humano descubre constantemente. Sin embargo, el hecho de que la materia sea regida por estas leyes, no impide que el ser humano la transforme y la someta a sus fines. Estas transformaciones obedecen no sólo a una época histórica, sino también a la naturaleza de la propia materia, la cual ha sido mejor entendida a través del tiempo (Schmidt, 1977, p. 71). La separación de los metales de la matriz rocosa es un ejemplo contundente de este proceso, cuando el ser humano llega a comprender las reacciones fisicoquímicas que ocurren en un proceso minero, logra mejorar los reactivos que separan unos metales de otros.

El uso del concepto de metabolismo social para explicar las relaciones entre los seres humanos y la naturaleza fue un concepto central que Marx utilizó para el análisis de los valores de uso y del proceso de trabajo. Fue a partir de este análisis que Marx desarrolló su principal crítica ecológica conocida como “la fractura metabólica”. Marx destacó que el rompimiento del ciclo de la tierra en la agricultura capitalista industrializada (el hecho de trasladar los nutrientes de la tierra del campo a la ciudad) constituía una fractura metabólica entre los seres humanos y la naturaleza (Foster, 2013b). Un proceso que ponía de manifiesto que en la medida en que el capitalismo se desarrollaba, el metabolismo entre el ser humano y la naturaleza se iba modificando, con la posibilidad de propiciar desequilibrios en el ambiente.

En la naturaleza nada ocurre en forma aislada. Cada fenómeno afecta a otro y es, a su vez, influenciado por éste; y es generalmente el olvido de este movimiento y de esta interacción universal lo que impide a nuestros naturalistas percibir con claridad las cosas más simples. [...] Pero cuanto más los hombres se alejan de los animales, más adquiere su influencia sobre la naturaleza el carácter de una acción intencional y planificada cuyo fin es lograr objetivos proyectados de antemano (Engels [1876], 2008, pp. 176–177).

Los cambios en el metabolismo social constituyen el centro de los problemas ambientales que hoy enfrenta la sociedad. A medida que el capitalismo se desarrolla, las interacciones entre la naturaleza y los seres humanos pueden llegar a provocar impactos ambientales no sólo a nivel local, sino también a nivel regional y global (Foster, 2013b). La minería constituye una de las actividades económicas que más impactan el ambiente

externo. En el capítulo 5 apartado 5.3 se desarrolla un análisis del volumen de agua que algunas empresas mineras utilizan diariamente. Un volumen que bien puede cubrir las demandas de ciudades enteras.

Parte de los efectos del metabolismo social en el capitalismo se expresan en términos de degradación ambiental, un fenómeno que puede manifestarse en depredación o contaminación del ambiente. En ambos casos, el ser humano se enfrenta a “una diferencia de ritmo o velocidad entre los ciclos naturales y los ciclos humanos”(Foladori, 2005, p. 16). Los problemas de depredación surgen cuando las tasas de extracción de recursos naturales son mayores que las tasas de reproducción natural (Foladori, 2005, p. 16).

De igual manera, la contaminación ambiental es un fenómeno que surge cuando las tasas de generación de residuos procedentes de las actividades económicas, superan los ritmos naturales de asimilación (Foladori, 2005, p. 16). La magnitud de este fenómeno no sólo depende de la cantidad de residuos vertida al ambiente, sino también de la concentración y la variedad de los contaminantes. En el capítulo 6 se desarrolla un análisis de los procesos mineros y su interrelación con el ambiente, y de las cantidades de sustancias químicas que esta actividad emite al ambiente.

El trabajo es un proceso que media entre la naturaleza y el ser humano. Es una condición que siempre ha estado presente en el metabolismo social de los distintos modos de producción, aunque su forma ha cambiado. Este proceso, en términos individuales o parciales, termina cuando se obtiene “un valor de uso, un material de la naturaleza adaptado a las necesidades humanas mediante un cambio de forma” (Marx [1867], 1975a, p. 219). Un objeto que puede ser una materia prima, un instrumento de trabajo o un producto (Marx [1867], 1975a, p. 221). Pero los valores de uso no pueden ser enviados al mercado si no poseen un valor de cambio. Estos objetos sólo pueden ser mercancías en la medida en que son útiles, y son portadores de un valor que les permite compararse con el resto de las mercancías. Por ende, las mercancías son mercancías debido a que tienen dos formas, una natural y otra de valor (Marx [1867], 1975a, p. 58).

El valor de cambio representa una relación cuantitativa entre mercancías, que permite intercambiarlas en el mercado. Este intercambio (intercambiar una cosa por otra) es el medio por el cual, los productos se convierten en mercancías o en productos sociales, y se manifiestan como partes del trabajo social (Marx [1867], 1975a, pp. 88–89). La magnitud del valor de cambio deriva de la cantidad de trabajo socialmente necesario requerido para producir un valor (Marx [1867], 1975a, p. 48).

Cualquier mercancía es el resultado de un trabajo concreto y un trabajo abstracto. El trabajo concreto se circunscribe a la aplicación de un determinado conocimiento para producir un valor de uso. A su vez, el trabajo abstracto representado por la fuerza de trabajo utilizada, se expresa en el valor de cambio de una mercancía (Marx [1867], 1975a, p. 57). El trabajo asalariado es la expresión concreta de esta relación social, a través de la cual se enfrentan las mercancías en el mercado.

El capitalismo no es una forma simple de producción de mercancías, su principal fin no es producir valores de uso para satisfacer las necesidades humanas, sino producir valores de cambio que acrecienten las ganancias de las empresas y aseguren su permanencia en el mercado. Esto también significa que el proceso productivo se replica un sinnúmero de veces. Sin contar que el capital productivo está siendo cada vez más suplantado por el capital financiero, donde la producción de valores de uso desaparece por completo, y el dinero genera más dinero (Foster, 2013a).

Todo trabajo posee relaciones técnicas y relaciones sociales, cuya naturaleza depende del contexto histórico del que se hable. Estas relaciones se encuentran reguladas por leyes económicas, cuyas consecuencias sociales han sido más difíciles de prever que las consecuencias del descubrimiento y la aplicación de las leyes naturales (Engels [1876], 2008, p. 180). Uno de los principales logros del pensamiento de Marx fue precisamente descubrir que la sociedad se encuentra regida por estas leyes económicas independientes de la voluntad humana.⁹

⁹ Así como Darwin descubrió la ley del desarrollo de la naturaleza orgánica, Marx descubrió la ley del desarrollo de la historia humana: el hecho, tan sencillo, pero oculto bajo la maleza ideológica, de que el hombre necesita, en primer lugar, comer, beber, tener un techo y vestirse antes de poder hacer política, ciencia, arte, religión,

Las fuerzas productivas y las relaciones de producción acompañadas de una superestructura, constituyen lo que se conoce como un sistema social, un hecho histórico que guarda ciertas relaciones entre sí. La superestructura contempla las relaciones sociales conscientes y aquellas ideas y actitudes que facilitan la existencia de un modo de producción determinado (Lange, 1966, p. 32).¹⁰

Las leyes jurídicas parte de la superestructura son un reflejo de las leyes económicas que gobiernan a las relaciones de producción. Precisamente, son estas últimas leyes y no las jurídicas las que consolidan el fundamento de toda la organización social y, la forma como el Estado se estructura (Marx [1867], 1981, p. 1007). En consecuencia, las leyes jurídicas no son superiores a las relaciones de producción ni al desarrollo cultural condicionado por estas mismas (Marx [1875], 1977, p. 12).

Mi investigación me llevó a la conclusión de que, tanto las relaciones jurídicas como las formas de Estado no pueden comprenderse por sí mismas ni por la llamada evolución general del espíritu humano, sino que, por el contrario, radican en las condiciones materiales de vida cuyo conjunto resume Hegel siguiendo el precedente de los ingleses y franceses del siglo XVIII, bajo el nombre de "sociedad civil", y que la anatomía de la sociedad civil hay que buscarla en la economía política (Marx [1859], 2001).

A lo largo de la historia, las leyes jurídicas se han organizado para cumplir su principal cometido, que no es otro más que apoyar la consolidación de las relaciones de producción de una época dada (Cohen, 1978, p. 256). Si bien las relaciones de producción tienen gran influencia en los acontecimientos históricos, también las leyes jurídicas y otros factores pueden influir en el curso de las luchas (Engels [1890], 2001). Al igual que otras leyes sociales, las leyes jurídicas son dinámicas, se crean, se desarrollan y pueden extinguirse; por esta misma razón, pueden contribuir a profundizar las relaciones capitalistas, o en última instancia también pueden contribuir a cambiarlas. El capítulo 5 se realiza un análisis de la

etc.; que, por tanto, la producción de los medios de vida inmediatos, materiales, y por consiguiente, la correspondiente fase económica de desarrollo de un pueblo o una época es la base a partir de la cual se han desarrollado las instituciones políticas, las concepciones jurídicas, las ideas artísticas e incluso las ideas religiosas de los hombres y con arreglo a la cual deben, por tanto, explicarse, y no al revés, como hasta entonces se había venido haciendo. Pero no es esto sólo. Marx descubrió también la ley específica que mueve el actual modo de producción capitalista y la sociedad burguesa creada por él. El descubrimiento de la plusvalía iluminó de pronto estos problemas, mientras que todas las investigaciones anteriores, tanto las de los economistas burgueses como las de los críticos socialistas, habían vagado en las tinieblas (Engels, 1883).

¹⁰ La superestructura es un conjunto de instituciones no económicas entre las que destacan el sistema legal y el Estado (Cohen, 1978, p. 238).

legislación ambiental y la minería, donde se presentan varios ejemplos que muestran cómo las normas se abstienen de regular determinadas actividades para garantizar la reproducción del capital minero.

Por su parte, las leyes económicas son resultado de las relaciones de producción y del desarrollo de las fuerzas productivas, su alcance es histórico, desaparecen en la medida en que la sociedad se desarrolla (Lange, 1966, pp. 62–63). No son un producto de la mente del ser humano, ni tampoco de su conciencia o de su voluntad (Lange, 1966, p. 55).

En la producción social de su vida los hombres establecen determinadas relaciones necesarias e independientes de su voluntad, relaciones de producción que corresponden a una fase determinada de desarrollo de sus fuerzas productivas materiales. El conjunto de estas relaciones de producción forma la estructura económica de la sociedad, la base real sobre la que se levanta la superestructura jurídica y política y a la que corresponden determinadas formas de conciencia social (Marx [1859], 2001).

Las leyes económicas gobiernan tanto las relaciones técnicas como las sociales. Las relaciones técnicas se establecen en el momento en que el hombre transforma a la naturaleza. Estas relaciones están determinadas por el nivel de desarrollo de las fuerzas productivas, acaecidas en un momento histórico dado. La metalurgia de metales preciosos es un buen ejemplo de los cambios que se pueden suscitar en las relaciones técnicas a través del tiempo. Durante la época colonial, el oro y la plata eran extraídos mediante la amalgamación con mercurio, una técnica menos eficiente que la lixiviación con cianuro, muy utilizada en la actualidad.

Las relaciones técnicas a su vez determinan ciertas relaciones de balance dentro del mismo proceso productivo, las cuales también están delimitadas por un nivel de desarrollo técnico dado (Lange, 1966, p. 59). Las relaciones de balance determinan la cantidad de materia y energía que se requiere para producir un determinado valor de uso con ciertas fuerzas productivas; y también la cantidad de fuerza de trabajo necesaria. Asimismo, mediante estas relaciones es posible determinar la cantidad de residuos que se pueden emitir al ambiente. En el mercado, tanto las relaciones técnicas como las de balance, imprimen cierto nivel de competitividad entre las empresas.

El ahorro de desechos se debe, en parte, a la buena calidad de la maquinaria empleada. Se economizan aceite, jabón, etc., en la misma relación en que las partes de la máquina se

hallan más exactamente trabajadas y mejor pulidas. Esto se refiere a los materiales auxiliares. Pero en parte, — y esto es lo más importante— depende de la calidad de las máquinas y de las herramientas empleadas el que una parte mayor o menor de la materia prima se transforme en desperdicios en el curso del proceso de la producción (Marx [1867], 1976, p. 126).

En conjunto estas relaciones dan origen a las leyes técnicas y de balance, las cuales se vuelven más complejas en la medida en que se desarrollan las fuerzas productivas. Las leyes técnicas y de balance de la producción son sociales e históricas al igual que la producción misma (Lange, 1966, p. 64). Estas leyes son consecuencia de las necesidades materiales y energéticas de los procesos, no dependen de la voluntad del ser humano, aunque el personal técnico puede llegar a conocerlas casi en su totalidad (Lange, 1966, p. 61).

Las relaciones sociales instauradas entre los individuos y el proceso productivo mejor conocidas como relaciones de producción, definen la propiedad de los medios de producción y, por consiguiente, la propiedad de los bienes producidos. Estas relaciones a su vez determinan las relaciones de distribución de los recursos económicos generados de la venta de las mercancías producidas. En otras palabras, deciden cuanto se debe de pagar a los empleados, a los contratistas, al mantenimiento del inmueble, etcétera. Las relaciones de producción y de distribución son el fin último de la actividad económica (la obtención de ganancia), y el estímulo e incentivo que dirige la actividad humana (Lange, 1966, p. 60). Estas relaciones se traducen en leyes del comportamiento humano, las cuales son independientes de la voluntad del ser humano (Lange, 1966, p. 61).

Las relaciones de producción y de distribución también determinan la manera como se divide el trabajo dentro de un proceso productivo, y dentro de un grupo de empresas, es decir, definen como se entrelazan las actividades económicas (Lange, 1966, p. 60). Estos actos dan lugar a las leyes del entrelazamiento de las acciones humanas (Lange, 1966, p. 61), las cuales son independientes también de la voluntad humana (Lange, 1966, p. 62).

Pero no todas las relaciones de distribución derivan de las relaciones de producción, algunas proceden de la superestructura como, por ejemplo, el pago de impuestos. La acción de la superestructura sobre las relaciones de distribución también crea estímulos

económicos como, por ejemplo, la prohibición de ciertas actividades so pena del pago de una multa. De igual manera, la superestructura puede influir en la forma como se entrelazan las empresas (Lange, 1966, p. 61). Estas relaciones creadas por la superestructura son conscientes y dependientes de la voluntad humana, son el resultado de la lucha de clases.

Las leyes jurídicas afianzan la realidad económica o tienden a modificarla. En la medida en que las leyes responden a un Estado que obedece a las clases dominantes, las leyes tenderán a garantizar la reproducción de las relaciones sociales existentes. Cuando el Estado expresa importantes contradicciones de clase, o se distancia en momentos históricos de las clases dominantes, la legislación puede tender a alterar las relaciones de producción existentes. En el caso de la legislación ambiental analizada en el capítulo 5, se trata de la primera alternativa. La legislación apoya el curso de las relaciones sociales existentes y garantiza la obtención de ganancia. Empero, la presión nacional e internacional por la defensa del medio ambiente obliga a que la legislación regule la actividad económica.

Las leyes ambientales se presentan como un cúmulo de disposiciones ordenadas que contemplan entre sí una perspectiva de la relación que debe guardar el ser humano respecto a la naturaleza. El acometido es tratar de evitar o minimizar los impactos ambientales que pudieran suscitar las relaciones económicas de un momento histórico determinado. Es posible encontrar diversas manifestaciones de las leyes económicas en las leyes ambientales. Las leyes técnicas y de balance pueden ser encontradas en la regulación de aspectos técnicos que inciden en el comportamiento ambiental de una determinada actividad productiva. Tal es el caso de las normas oficiales mexicanas, que regulan la emisión de contaminantes al ambiente. En el caso de la minería, un aspecto muy interesante, donde se ve reflejada la evolución de las leyes técnicas, es en el concesionamiento de los yacimientos. Actualmente, una propiedad puede alojar casas habitación en su superficie y estar concesionada subterráneamente. Esto es posible gracias a los nuevos métodos de explotación de yacimientos que minimizan los daños colaterales de esta actividad.

Las leyes del comportamiento humano y del entrelazamiento de las acciones humanas también pueden manifestarse en el plano ambiental. Un ejemplo de las primeras

puede ser encontrado en la Constitución, cuando se dicta el concesionamiento de los recursos naturales para su disfrute por terceras personas, como es el caso de los minerales y del agua. Las leyes del entrelazamiento de las acciones humanas se presentan en los intrincamientos que realizan las empresas productoras con las de servicios, para proveerse de auditorías ambientales, de laboratorios de prueba, entre otros aspectos.

La producción capitalista comenzó cuando los dueños de los instrumentos de trabajo emplearon mayor número de obreros para realizar las mismas actividades y, en consecuencia, las mercancías producidas aumentaron en una escala cuantitativa. Este suceso es considerado el punto de inicio de la producción capitalista. La diferencia entre un taller artesanal y la manufactura era el número de obreros que se ocupaban para realizar una misma actividad en un mismo tiempo (Marx [1867], 1975b, p. 391). Luego, el paso de la de la manufactura a la gran industria, reemplazó las herramientas o instrumentos de trabajo por maquinaria (Marx [1867], 1975b, p. 451). La diferencia entre una herramienta y una maquinaria estriba en que el ser humano le imprime movimiento a la primera, en tanto que la segunda puede ser impulsada por el viento, el agua u otro elemento (Marx [1867], 1975b, p. 452).

Un objeto para ser catalogado como una fuerza productiva, “debe poder ser usado por un agente productor de tal forma que la producción se dé (en parte) como resultado de su uso y que la intención de alguien sea que ese elemento contribuya a la producción. Pero ese alguien no tiene por qué ser el propio productor inmediato. Podría ser un no productor encargado del proceso”(Cohen, 1978, p. 34). La tecnología es considerada una fuerza productiva debido a que materializa los conocimientos científicos y los lleva al campo de los procesos productivos. Ésta es representada tanto por objetos (maquinaria y equipo) como por sistemas que organizan la producción. Pero también, desde el punto de vista marxista la tecnología tiene un carácter social porque su uso y desarrollo depende de las relaciones económicas inmersas en el sistema capitalista (Katz, 1999).

Cada descubrimiento se convierte en la base de nuevos inventos o de un nuevo perfeccionamiento de los modos de producción. El modo capitalista de producción coloca primero las ciencias naturales al servicio inmediato del proceso de producción, cuando el desarrollo de la producción suministra, en cambio, los instrumentos para la conquista

teórica de la naturaleza. La ciencia obtiene el reconocimiento de ser un medio para producir riqueza, un medio de enriquecimiento (Marx [1861-1863], 1982, p. 191).

Si bien la tecnología facilita el desarrollo de actividades complicadas para el ser humano, este aspecto no es propiamente su principal sentido. Las empresas realizan cambios tecnológicos para obtener mayores ganancias (Marx [1867], 1975b, p. 451), aunque para ello deban producir objetos útiles. El cambio tecnológico en el marxismo profundiza la vigencia de la ley de valor. El cambio tecnológico disminuye el trabajo socialmente necesario empleado en la fabricación de mercancías y, con ello, también disminuyen los precios relativos (Katz, 1996).

Hablando en términos muy generales, la finalidad de la maquinaria es reducir el valor de la mercancía, ergo su precio, convertirla en más económica, vale decir disminuir el tiempo de trabajo necesario para la producción de una mercancía, pero de ninguna manera es el de disminuir el tiempo de trabajo durante el cual el trabajador está ocupado en la producción de esta mercancía a más bajo precio. En efecto, se trata de esto; no de acortar la jornada laboral sino, para todo desarrollo de la fuerza productiva sobre una base capitalista, de acortar el tiempo de trabajo que necesita el trabajador para la reproducción de su capacidad de trabajo, en otras palabras para la reproducción de salarios, o sea la disminución de la parte de la jornada que él trabaja para sí mismo, la parte retribuida de su tiempo de trabajo, y de prolongar, mediante la reducción de ésta, la otra parte de la jornada, la que él trabaja gratis para el capitalista, la parte no retribuida de la jornada laboral, su tiempo de plustrabajo (Marx [1861-1863], 1982, p. 77).

Asimismo, el cambio tecnológico provoca constantes confrontaciones entre los empresarios que introducen nuevas tecnologías en sus procesos para ampliar sus beneficios, y los trabajadores que se ven desplazados de sus actividades laborales, a pesar de que pueden ser partícipes del desarrollo de estas nuevas tecnologías. Este conflicto de intereses es uno de los puntos de mayor atención del marxismo (Katz, 1996). Usualmente sólo se introduce un cambio tecnológico en la esfera productiva cuando la nueva tecnología resulta ser más barata que el equivalente tiempo de trabajo socialmente necesario.

As Marx discusses extensively in the second section of the fifteenth chapter of Capital Volume I, the employment of machinery in the capitalist production process is only worthwhile if the production-costs of the product are reduced. And that only occurs when the value-yield of the machine to the product is lower than the reduction of costs that occurs due to the reduced expenditure of living labour. If the employment of machinery saves an hour in the production of a piece, then the capitalist saves the wage for this one hour. If the value-yield of the machine to the product is higher than the wage for an hour, then the capitalist will not employ the machine, since the machine may indeed make labour more productive, but nevertheless raise the production-costs. Only when the value-yield of the machine is less than the saved wage-costs is the machine employed (Heinrich, 2013, p. 208).

Esto muestra una transición del propio sistema capitalista, pues con el tiempo, desaparecerán los empleados que crean el plusvalor, aumentando con ello el desempleo, un elemento que puede obstaculizar la acumulación capitalista.¹¹ La minería es un ejemplo palpable en países desarrollados como Canadá y Australia donde gran parte de los procesos se encuentran automatizados.

Newmont Goldcorp Corporation y dignatarios de todo Ontario inauguraron el Borden Gold Project (Borden), la 'mina del futuro'. La mina Borden, de propiedad al 100 por ciento, se encuentra cerca de Chapleau, Ontario, y cuenta con controles de salud y seguridad de última generación, tecnologías y procesos de minería digital y vehículos de energía baja en carbono, todos anclados en una asociación mutuamente beneficiosa con las comunidades locales (Minería en línea, 2019a).

En los últimos años la minería mexicana ha aumentado considerablemente el capital fijo invertido, y ha tecnificado las minas. Es probable que la cantidad de jornales ocupados por tonelada de mineral extraído haya disminuido. Sin embargo, esta afirmación no se aprecia en las estadísticas globales de México, porque la superficie de explotación minera ha venido aumentando significativamente, con lo cual también el empleo ha aumentado. En el capítulo 4 se retoma este tema con un poco de mayor profundidad.

En el capitalismo, la tecnología es propiedad de un grupo minoritario de personas, por lo cual, su desarrollo está orientado hacia la generación de ganancias y, en menor escala hacia otras actividades como la protección del ambiente. Además, su carácter privado ha imposibilitado la planificación de su desarrollo y su utilización, con lo cual las consecuencias de su uso son impredecibles. Casi todos los cambios tecnológicos reflejan los intereses de la clase dominante, suponer que la sociedad aprueba de manera consensuada la evolución de la tecnología equivale a ignorar que los recursos tecnológicos son de propiedad privada y, que los dueños son quienes deciden el destino de los cambios tecnológicos (Katz, 1999).

El capitalismo es el primer modo de producción en la historia de la humanidad que crea sus propias necesidades para no detener el sistema productivo y continuar incrementando las ganancias. Los nuevos desarrollos tecnológicos han superado las

¹¹ El plusvalor generado en un proceso de producción equivale al excedente del valor del producto obtenido después de pagar el valor de todos los elementos que participaron en la producción del producto (Marx [1867], 1975a, p. 255).

restricciones ambientales. El capital ha subyugado a la naturaleza a través de: i) la producción ilimitada, los procesos productivos se diseñan para operar las 24 horas al día; ii) la apropiación desmedida de los recursos naturales para solventar la producción; iii) la captación de nuevos recursos; iv) la generación ilimitada de residuos; v) la expansión del conocimiento para incrementar la productividad; y vi) las transformaciones ecosistémicas de alcance global.

El problema de la política ambiental actual es que los problemas ambientales son tratados de manera reduccionista, como si derivaran exclusivamente del uso de tecnologías contaminantes o que no cumplen con las normas ambientales. Esta visión ambientalista coloca a la tecnología en dos alternativas como tecnología contaminante, o como tecnología verde; no identifica los fines para los cuales fue creada. En consecuencia, esta visión también clasifica a las empresas como amigables con el ambiente o no, dependiendo de la cantidad y la calidad de tecnologías que adopten en sus procesos.

No se puede desconocer que los efectos sobre la naturaleza externa son diferentes según el tipo de tecnología; y por eso las tecnologías limpias o verdes contienen algo de verdad. El problema es que las tecnologías no son neutras. Las relaciones técnicas no pueden ser analizadas separadamente de las relaciones sociales. Son estas últimas las que comandan a las primeras. Cuando existen relaciones sociales que promueven la degradación del ambiente, las alternativas técnicas sólo pueden ser paliativas, cambiar el problema de un lugar o tema para otro (Foladori & Tommasino, 2012, p. 82).

El hecho de que la tecnología contribuya a maximizar las ganancias en el proceso productivo, la sitúa como no neutral. La neutralidad se refiere a que la aplicación de una tecnología determinada es indistinta a los fines que se destina; y sólo depende del propósito para la cual se emplea. Entonces, si se considera que la tecnología es aplicada indiferentemente para todos los fines humanos, entonces, se pudiera caracterizar como neutra. Empero, es difícil sostener esta posición de neutralidad de la tecnología. En la actualidad, la tecnología es utilizada con limitaciones, no sólo debido al estado del conocimiento, sino también debido a las estructuras de poder que desvían sus aplicaciones. La tecnología actual no es neutra, en realidad es utilizada para favorecer ciertos fines, y obstruir otros (Feenberg, 2005, p. 116). Estudiando la historia de la industria automotriz

norteamericana Noble da varios ejemplos de cómo los intereses políticos y de clase frenan la innovación tecnológica conscientemente (Noble, 2017).

En la actualidad, la principal vía que se ofrece para solucionar los problemas ambientales es el cambio de tecnologías en una dirección que promueva sobre todo la eficiencia energética y la eliminación de contaminantes (Foster, 2001, p. 143). La paradoja de Jevons es un buen ejemplo para explicar cómo la nueva tecnología influye en la expansión de los problemas ambientales en el capitalismo. Esta paradoja argumenta que el aumento de la eficiencia de un recurso, sólo da como resultado un aumento de su demanda y, con ello, una creciente escalada en su producción con sus respectivas consecuencias ambientales (Foster, 2001, p. 144). En el caso de la minería, por ejemplo, el aumento de la demanda de baterías de litio ha aumentado bruscamente la demanda de este metal y, con ello, ha aumentado el desarrollo de nuevos proyectos mineros con sus consecuentes impactos ambientales (Minería en línea, 2019c).

Los nuevos avances tecnológicos no restringen los procesos de producción capitalista. De acuerdo con Marx, los únicos controles reales que en un momento dado pudieran limitar la producción, son la competencia mutua y las fuerzas impersonales del mercado en un corto plazo, y las crisis económicas en un largo plazo. La producción capitalista no se puede detener fácilmente, la satisfacción de las necesidades humanas es sólo una acción colateral de su principal objetivo (Foster, 2001, p. 145). El valor de uso de las distintas mercancías, se encuentra cada vez más doblegado a su valor de cambio (Foster, 2001, p. 146).¹²

Con la introducción de la maquinaria, con la cual los medios de trabajo asumen grandes dimensiones de valor y se representan en voluminosos valores de uso, cree esta diferencia entre proceso laboral y proceso de valorización y ésta devine un momento significativo en el desarrollo de la fuerza productiva y en el carácter de la producción (Marx [1861-1863], 1982, p. 84).

¹² Hay muchos ejemplos de cómo mejoran las condiciones ambientales en momentos de crisis donde se reduce la producción; hecho estudiado, por ejemplo, en la disminución de la forestación por el descenso de los precios del ganado durante la crisis del 2008 en la Amazonia (Sharon, 2009). Véase sobre el tema Bowen & Stern (2010).

Al estudiar el cambio tecnológico, Marx explicó que el control del proceso de producción y la expropiación de los conocimientos de los trabajadores eran componentes esenciales del proceso de valorización o de extracción de plusvalía (Katz, 1996). Los cambios tecnológicos han sido el principal factor que ha apoyado desmedidamente estos componentes, no sólo se han apropiado de los conocimientos de los trabajadores, sino que también los han superado, a la vez que han impedido que los trabajadores conduzcan el proceso productivo (Braverman, 1984, pp. 201–202). La primera división del trabajo y las revoluciones industriales posteriores se han desarrollado en esta dirección, el objetivo ha sido desplazar al obrero como un elemento subjetivo del proceso, para transformarlo en un objeto (Braverman, 1984, p. 212).

El control de los procesos ha cobrado fuerzas desde el inicio de la tercera revolución industrial durante los años setentas, caracterizada en gran medida por la automatización de los procesos. El desarrollo de los nuevos sistemas económicos descansa sobre el paradigma del control absoluto, que orienta los nuevos cambios tecnológicos hacia la pérdida del poder de los trabajadores de todos los niveles, y el aumento del ejército de reserva. Una autonomía operativa que permite a los propietarios o sus representantes tomar decisiones, sin tomar en cuenta el punto de vista de los trabajadores (Feenberg, 2005, p. 115). Este nuevo desarrollo tecnológico está basado en la informatización, en la inteligencia artificial y en la digitalización de los procesos, una revolución industrial mejor conocida como industria 4.0.

Marx calificó como dominación impersonal, el hecho de que los gerentes (representantes de los propietarios) controlaran los procesos productivos. Un suceso propio del sistema capitalista, a diferencia de la dominación personal de los modos de producción anteriores. Este nuevo tipo de dominación puede ser encontrado en todos los niveles organizativos. Marx no anticipó que este tipo de control o dominación permearía no sólo en el sector privado, sino que también se expandiría al sector público (Feenberg, 2005, p. 115).

Pero no sólo el control absoluto y la expropiación del conocimiento hacen que los procesos sean redituables, también participa la subordinación de las fuerzas naturales

(como el agua o el viento) al proceso de producción. Estas fuerzas naturales como tales no poseen costo alguno, no son producto del trabajo humano. Sin embargo, el ser humano para apropiarse de ellas, requiere utilizar tecnología especializada, producto de un trabajo pasado. Como estas fuerzas no tienen ningún costo, entran al proceso sin aumentar los costos del producto, por el contrario, los disminuyen (Marx [1861-1863], 1982, pp. 190–191). De igual manera, la explotación desmedida sin costo de los recursos naturales ha hecho redituable el proceso productivo. Éstos al igual que las fuerzas naturales no son valorados, y su uso a gran escala ha ocasionado desequilibrios ecológicos, traducidos en contaminación y depredación ambiental. Estos fenómenos muchas de las veces no pueden ser subsanados con una inversión de capital, sobre todo cuando se habla de recursos naturales no renovables (Leff, 2001, pp. 346–347).

En conclusión, el metabolismo social es un proceso dinámico que siempre ha existido en la historia del ser humano. Su forma, extensión y ritmo depende de la dialéctica entre las relaciones sociales y las fuerzas productivas. No existe un metabolismo “en general”, en cada época histórica habrá que distinguir sus particularidades. Los nuevos avances tecnológicos inmersos en este proceso han contribuido a: i) disminuir el trabajo socialmente necesario en la producción de mercancías; ii) controlar el proceso; iii) dominar las fuerzas de la naturaleza y los recursos naturales; y iv) aumentar las ganancias. De hecho, esta última premisa es el objetivo principal del capitalismo, la satisfacción de las necesidades humanas sólo es vista como una acción colateral de la generación de ganancias.

Las leyes jurídicas son un reflejo de las leyes económicas y, como tales, velan por el buen desarrollo de las relaciones de producción. Son leyes voluntarias que conforme han ido evolucionado, han acogido otras leyes que, si bien no derivan directamente de las relaciones de producción, tienden de alguna manera a preservarlas. Tal es el caso de la legislación ambiental que trata de minimizar los desequilibrios ambientales generados por la minería so pena de que las condiciones ambientales actuales se agraven.

Finalmente, todos los problemas ambientales actuales derivan de la supremacía del valor de cambio sobre el valor de uso. El sistema asume que la solución de estos

desequilibrios estriba en el desarrollo de tecnologías verdes, sin embargo, el hecho de que el sistema tenga como premisa el desarrollo de una producción ilimitada, implica que los impactos ambientales no desaparecerán, al contrario, también serán ilimitados.

CAPÍTULO 3 CONTEXTO DE LA MINERÍA EN EL SIGLO XXI

El presente capítulo se divide dos apartados, en el primero se realiza una descripción de las etapas del desarrollo neoliberal en México y su relación con la minería. Como se verá, estas etapas se caracterizan por una serie de hechos que han convertido a la minería en una actividad económica prioritaria a la cual se han subordinado diversas legislaciones como la minera, la agraria y la ambiental.

En el segundo apartado se analiza el escenario mundial de la producción de los metales en estudio y el papel que México desarrolla en este contexto. Los movimientos de importación y exportación de metales no son considerados en este apartado, debido a que la investigación se centra en el estudio de los procesos mineros.

3.1 El neoliberalismo y la minería en México

Después de la Segunda Guerra Mundial, diversos países reestructuraron sus políticas gubernamentales y sus relaciones internacionales para prevenir el desarrollo de otra depresión económica como la acontecida en los años treinta. Los estados combinaron acciones estatales, de mercado y de instituciones democráticas para fortalecer el pleno empleo, el crecimiento económico y el bienestar de los ciudadanos. Este modelo económico denominado Industrialización por Sustitución de Importaciones (ISI) se caracterizó en gran medida porque los estados intervinieron en el desarrollo de diversos sectores económicos (Harvey, 2007, p. 17).

Naciones Unidas (UN por sus siglas en inglés) menciona que entre los años 1929 y 1960 en América Latina existían cinco países (Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México) que expandieron su PIB industrial en un 36 % como consecuencia de la adopción de ISI (UN, 1966, p. 26). Este modelo inició en México desde los años cuarenta y terminó hasta principios de los ochenta, básicamente transformó a esta nación en una economía semi industrializada con un alto grado de urbanización (Rivera, 1992, pp. 24–25). Sus dos pilares fueron: la creación de un mercado cerrado que garantizó negocios cautivos para la clase empresarial, y el subsidio de la clase capitalista, con el objeto de propiciar su desarrollo (Rivera, 1992, p. 25).

Este modelo económico comenzó a desmoronarse en Latinoamérica desde la década de los años setenta, cuando los países industrializados en medio de una crisis presenciaron estancamiento productivo, índices altos de inflación y desempleo, tasas de interés al alza, y problemas en sus pagos externos (Tello, 2008, p. 544).

Las economías altamente industrializadas dejaron de ser el motor del crecimiento de la actividad económica mundial y la tasa de expansión del comercio internacional se desplomó rápidamente (a partir del primer shock petrolero en 1973 y, aún más, después del segundo a finales de la década) (Tello, 2008, p. 544).

Estados Unidos y Reino Unido se coordinaron para enfrentar esta crisis a través de varias acciones: i) elevación de las tasas de interés de países deudores; ii) incrementó de las barreras comerciales para disminuir las exportaciones; iii) disminución del crecimiento de sus economías para minimizar la demanda de bienes y servicios de otros países; iv) disminución del precio del petróleo; y v) disminución de préstamos a países deudores (Tello, 2008, p. 546). Estas acciones causaron grandes desequilibrios en los países en desarrollo quienes para sostener sus economías contrataron deuda externa con la banca comercial europea y norteamericana (Tello, 2008, pp. 544–545).

Después de estos sucesos, comenzó un largo periodo de ajuste estructural que obligó a muchos países a adoptar políticas neoliberales (Harvey, 2007, p. 30). Las reformas impuestas a Latinoamérica durante los ochenta y noventa fueron de dos tipos, en las primeras prevalecieron acciones de ajuste antiinflacionario, y en las segundas predominó el Consenso de Washington con aperturas comerciales, privatizaciones y flexibilización laboral (Katz, 2015, pp. 81–82).¹³

A partir de esta etapa los países latinoamericanos abandonaron la política de ISI y se insertaron en el mercado global como proveedores de materias primas agro mineras,

¹³ De acuerdo con Tello, el Consenso de Washington “se caracteriza por un conjunto de reformas, destinadas a alterar de manera significativa la estructura de la economía. [...]. La magnitud y profundidad de las reformas entraña un periodo de transición, en el que se modifican las instituciones, se redefinen las relaciones entre los factores de producción y entre las clases sociales y en el que hay un reacomodo del poder” (2008, pp. 625–626).

receptores de maquiladoras y prestadores de servicios transnacionales (Katz, 2015, p. 86).

Esta nueva reestructuración mundial significó:

Por una parte, fuerza a los países a subordinarse a la lógica de la competencia mundial, lo que en términos prácticos significa desarrollar las exportaciones y abrir los mercados internos. Por otra parte, debilita los viejos controles que los Estados Nacionales habían desarrollado para regular los flujos de mercancías y capitales, e impone la necesidad de crear nuevas instituciones regulatorias de carácter supranacional para canalizar las nuevas fuerzas transformadoras (Rivera, 1992, p. 46).

En el caso de México, a principios del mandato del gobierno de José López Portillo (1976-1982) ocurrió una de las primeras recesiones contemporáneas más importantes registrada en 1977, en que el PIB decreció en -5.6 % como consecuencia de la firma de la primera “Carta de Intención” acordada con el FMI en 1977, que exigía la implementación de condiciones de austeridad de gran calado. No obstante, entre 1978 y 1980 ocurrió un ficticio y efímero auge económico debido al auge de la industria petrolera que detuvo por un momento el inicio de dichas políticas. El proceso inició después de que en 1982 se volviera a presentar una nueva situación recesiva con un incremento del PIB de 0.5 % en comparación con el año anterior de 7.9 %, uno de los más elevados en la historia de México (Ortiz, 1994, p. 45). Para solventar esta situación, México solicitó préstamos a la banca internacional, la presión del FMI no se hizo esperar y en ese momento, otorgó un “Convenio de Facilidad Amplia” que no era más que adherirse a la Carta de Intención acordada. En virtud de la constante fuga de capitales, José López Portillo nacionalizó la banca y estableció el control generalizado de cambios (Ortiz, 1994, p. 46).

Cordera Campos y Lomelí Vanegas dividen el desarrollo de las reformas neoliberales en cuatro etapas: la primera (1982-1985) se caracterizó por enfrentar los efectos de la crisis de la deuda; la segunda (1986-1994) presenció el cambio estructural y la primera generación de reformas; la tercera (1995-2000) profundizó el cambio estructural; y la cuarta (2001 en adelante) muestra ya un agotamiento de las políticas neoliberales (2005, p. 5). En los párrafos siguientes para exponer el desarrollo del neoliberalismo y la minería se retoma la periodicidad de dichas etapas, pero se sitúa como primer actor a la minería.

A principios de la primera etapa (1982-1985), los diversos desequilibrios económicos que enfrentaba México como la caída del precio del petróleo, la reducción de ventas

externas de este recurso natural y de otras mercancías, y el incremento de las tasas de interés de los bancos extranjeros pusieron fin a la rápida expansión de la economía mexicana sustentada en ISI (Tello, 2008, p. 583). El nivel de deuda adquirido propició que México se declarara insolvente para pagar los intereses, en este escenario suscribió la segunda “Carta de Intención” o “Convenio de Facilidad Amplia” con el FMI a finales de noviembre. La intención era tener el apoyo de este organismo para la adquisición de créditos urgentes frente a emergencias financieras como la que acontecía en este país (Ortiz, 1994, pp. 47 y 50). En dicha carta se exponen las políticas sobre las cuales México ha sustentado su economía durante las últimas décadas, y que han dado pie a la apertura y liberalización comercial, al ingreso al GATT, a la firma del TLC y a la desprotección a la industria nacional (Ortiz, 1994, p. 53).

Miguel de la Madrid (1982-1988) durante su mandato en pro de apoyar estas políticas, desarrolló algunos programas de ajuste estructural que pretendían entre otras cuestiones: restablecer los pagos de la deuda, disminuir la participación del Estado en asuntos económicos, dar apertura a la competencia internacional y combatir la inflación (Tello, 2008, pp. 635–636). El programa de privatización de entidades paraestatales constituyó uno de los más importantes.¹⁴ El gobierno inició esta política argumentando que no podía seguir subsidiando las más de 1 000 empresas paraestatales con demandas al alza. La crisis económica requería concentrar recursos financieros para sanear las finanzas públicas e incrementar el gasto social (Rogozinski, 1997, p. 108).

Antes del inicio de la privatización de las entidades paraestatales existía un total de 1 155, de las cuales casi el 33 % eran empresas que coordinaba la Secretaría de Minas e Industria Paraestatal (SEMIP). Una dependencia que también regulaba a la minería. El cuadro siguiente presenta un resumen de la organización de las empresas paraestatales.

¹⁴ Las entidades paraestatales según la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal se componen de 1) organismos descentralizados; 2) empresas de participación estatal, instituciones nacionales de crédito, organizaciones auxiliares nacionales de crédito e instituciones nacionales de seguros y de fianzas; y 3) fideicomisos (DOF, 2019d, p. 2 art. 3).

Cuadro 4 Organización de las empresas paraestatales en 1982

Sector	Organismos descentralizados	Empresas de participación estatal	Fideicomisos	Total
SEMIP	11	377	10	398
Total	103	829	223	1155

Fuente: adaptado de Rogozinski (1997, p. 43).

En su tercer informe de gobierno (1985), Miguel de la Madrid Hurtado ordenó la fusión, liquidación, transferencia y venta de 482 entidades paraestatales no estratégicas de las 1 155 que dirigía el Estado. Se acordó que el Estado sólo participaría en las áreas estratégicas reivindicadas en el artículo 28 constitucional (modificado el 3 de febrero de 1983) como la petroquímica básica y la generación de energía eléctrica (LXI Legislatura Cámara de Diputados, 2012, p. 132).

Las empresas públicas han sido uno de los instrumentos más efectivos con que el Estado mexicano ha contado para lograr el cumplimiento de sus objetivos económicos y sociales. Ponderando aciertos y errores, su balance para el desarrollo del país es positivo. Sin embargo, se tiene plena conciencia de que el sector paraestatal creció a lo largo del tiempo en forma desordenada, sin obedecer a planes definidos. El Estado promovió una gran diversidad de empresas, que retuvo innecesariamente bajo su control o absorbió empresas privadas fallidas, bajo el incorrecto argumento de proteger el empleo aun en proyectos estructuralmente inviables. Paradójicamente, la multiplicación excesiva de las empresas públicas debilitó al Estado al desequilibrarlo financieramente, y al limitar su capacidad de atender suficientemente sus responsabilidades primordiales (LXI Legislatura Cámara de Diputados, 2012, p. 132).

Las entidades paraestatales se redujeron a 700 entre los años 1983 y 1985, en un inició, la mayoría de las operaciones fueron fusiones, liquidaciones y transferencias a gobiernos estatales, pues la SEMIP había tratado de modernizar los sistemas productivos a cargo del Estado mexicano. Sin embargo, este programa de reconversión fue abandonado en 1985 al inició de la segunda parte del sexenio de Miguel de la Madrid cuando comenzaron a afectarse a las grandes empresas paraestatales como la Fundidora de Monterrey y Aeroméxico (Cordera Campos & Lomelí Vanegas, 2005, p. 7).

La segunda etapa de reestructuración neoliberal (1986-1994) aceleró la liberación comercial. Sin bien este suceso comenzó antes de la adhesión de México al GATT (1986), en los primeros meses de 1988 la economía mexicana ya era una de las más abiertas del mundo (Cordera Campos & Lomelí Vanegas, 2005, p. 7). La prontitud de la apertura tenía por objeto

reducir la crisis inflacionaria que México venía arrastrando desde el inicio de esta etapa (Tello, 2008, p. 685). Antes de la conclusión del sexenio de Miguel de la Madrid se promovió el Pacto de Solidaridad Económica (PSE), el programa de estabilización económica más exitoso de este sexenio. Sin embargo, al igual que los implementados por el expresidente Carlos Salinas de Gortari (1988-1994), no trascendió de la estabilización al fortalecimiento del país (Cordera Campos & Lomelí Vanegas, 2005, p. 8).

Cuando Salinas de Gortari inició su mandato, la deuda externa equivalía casi al 45 % del PIB, y se transfería el 7 % anual del producto nacional para el pago de intereses. Esto representaba un especie de transferencia de capital que imposibilitaba el crecimiento del país (Salinas de Gortari, 2000, p. 14). La primera acción que Salinas de Gortari emprendió en su sexenio fue la reestructuración de la deuda externa con varias instituciones, en primer lugar, con el FMI a través de la firma del Plan Brady (Salinas de Gortari, 2000, p. 22); en segundo lugar, con el Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo (Salinas de Gortari, 2000, p. 24); y en tercer lugar, con más de 500 bancos comerciales, un proceso que se tornó un poco más difícil que los anteriores (Salinas de Gortari, 2000, p. 32).

Estas negociaciones y el inicio de las medidas de cambio estructural facilitaron la repatriación de capitales y la atracción de nuevos proyectos de inversión extranjera (Salinas de Gortari, 2000, p. 33). Entre los años 1989 y 1992 se desarrolló el Pacto para la Estabilidad y el Crecimiento Económico (PECE) y, entre 1993 y 1994 se restringió la política monetaria y fiscal, se retomó la apertura comercial, se aceleraron las privatizaciones iniciadas en el sexenio anterior, y se delimitó la participación del Estado en la economía (Tello, 2008, p. 644). Los recursos que se obtuvieron de las privatizaciones se destinaron a solventar la deuda interna (Salinas de Gortari, 2000, p. 24). El número de entidades paraestatales disminuyó de 1155 a 219 entre diciembre de 1982 y junio de 1994, dentro de las cuales se encontraban 21 empresas mineras que también fueron privatizadas (Rogozinski, 1997, p.

113). El cuadro siguiente muestra los costos económicos de la venta de algunas empresas mineras.¹⁵

Cuadro 5 Algunas operaciones de venta de minas concluidas durante el periodo 1988-1994

Mina	Fecha de venta	Adquiriente	Precio nominal (miles de dólares)
Minera Real de Ángeles, S.A. de C.V.	09/02/1989	Promotora Frisco, S.A. de C.V.	43 038.0
Compañía Minera Cedros S.A. de C.V.	18/07/1989	Minas Peñoles, S.A. de C.V.	1 660.7
Compañía de Real del Monte y Pachuca, S.A.	23/02/1990	Grupo para México S.A. de C.V., México Fomento Empresarial, S.A. de C.V., Grupo Debir, S.A. de C.V. y Compañía Minera El Baztan, S.A.	6 000.0
Compañía Minera de Cananea, S.A. de C.V.	26/09/1990	Mexicana de Cananea, S.A. de C.V.	475 000.0
Minas de California, S.A.	27/08/1991	Industrias Peñoles, S.A. de C.V., a través de Refractarios Mexicanos, S.A. de C.V., Química del Rey, S.A. de C.V., Química Magna, S.A. de C.V., Química del Mar, S.A. de C.V. y Refractarios Hidalgo, S.A.	12 106.5

Fuente: elaboración propia a partir de Rogozinski (1997, p. apéndice 1).

Durante esta segunda etapa comenzó la liberación de las reservas minerales nacionales, entendidas como los recursos minerales que han sido cuantificados y estudiados. Este proceso inició en el sexenio de Miguel de la Madrid con la desincorporación de 1.2 millones de hectáreas, según se informó en el quinto informe de gobierno (1987) (LXI Legislatura Cámara de Diputados, 2012, p. 285). Pero se aceleró en el sexenio de Carlos Salinas de Gortari, donde se pusieron a disposición del capital minero nacional e internacional 5.2 millones de hectáreas.

Promovimos la modernización de la minería, a través de la adecuación del marco regulatorio, la simplificación administrativa, la modificación del régimen fiscal, la liberación de zonas en reservas mineras, así como la desincorporación de empresas públicas. Se han

¹⁵ Actualmente, la compra - venta y la asociación de empresas mineras continúan pero entre empresas privadas, un ejemplo representativo de ellas se dio en el mes de mayo de 2018, cuando la minera Canadiense First Majestic compró la empresa Primero Mining por 320 millones de dólares y, con ello, los activos de la mina "San Dimas" ubicada en Durango, dedicada a la producción de metales preciosos (CAMIMEX, 2019b, p. 33).

abierto nuevas posibilidades a los inversionistas nacionales y del exterior. En el transcurso de mi Gobierno se han desincorporado 5.2 millones de hectáreas de zonas en reservas mineras, 97 % del área retenida por el Estado hasta 1988. El país se mantiene entre los 10 primeros lugares en la producción de minerales (LXI Legislatura Cámara de Diputados, 2006, p. 398).

El cuadro siguiente muestra la evolución de la desincorporación de reservas mineras entre 1990 y 2017.¹⁶ Como se puede observar, el 97 % de éstas se desincorporó de 1990 a 1995.

Cuadro 6 Desincorporación de zonas de reserva minera periodo 1990 - 2017 (miles de hectáreas)

Año	Superficie vigente al inicio del periodo (miles de hectáreas)		Superficie vigente al cierre del periodo (miles de hectáreas)		
	Total	Superficie desincorporada	Total	Superficie concesible	Superficie no concesible
1990	5 393.8	612.8	4 781.0	4 684.4	96.6
1995	146.7	0.4	146.3	49.7	96.6
2000	128.4	18.1	110.3	13.7	96.6
2001	110.3	1.0	109.3	12.7	96.6
2002	109.3	6.4	102.9	6.3	96.6
2003	102.9	0.0	102.9	6.3	96.6
2004	102.9	0.0	102.9	6.3	96.6
2005	102.9	0.0	102.9	6.3	96.6
2006	102.9	1.6	101.3	4.7	96.6
2007	101.3	0.0	101.3	4.7	96.6
2008	101.3	0.0	101.3	4.7	96.6
2009	101.3	0.0	101.3	4.7	96.6
2010	101.3	0.0	101.3	4.7	96.6
2011	101.3	0.0	101.3	4.7	96.6
2012	101.3	0.0	172.6	76	96.6
2013	172.6	0.0	172.6	76	96.6
2014	172.6	0.0	172.6	76	96.6
2015	172.6	0.0	172.6	76	96.6
2016	172.6	0.0	172.6	76	96.6
2017	172.6	0.0	172.6	76	96.6

Fuente: elaboración propia con datos de Presidencia de la República (2012, p. 251, 2018, p. 585).

En el Programa Nacional de Modernización de la Minería 1990 – 1994 se acordó elaborar un inventario nacional de recursos minerales y la formación de un banco integral de datos e información geológica minera para beneficiar a los sectores público, privado y social (DOF, 1990b, p. 25 punto 3.2). Estos apoyos gubernamentales son poco considerados

¹⁶ Se considera que el territorio nacional posee una superficie de 1 964 375 de kilómetros cuadrados equivalentes a 196.4375 millones de hectáreas.

cuando se habla de políticas de apertura al capital extranjero. Las empresas mineras y en especial la gran minería hacen uso de información geológica en las primeras etapas de exploración cuando realizan una prospección regional. En ese sentido, los siguientes programas de desarrollo minero también continuaron incentivando la exploración de México a través de la provisión de cartografía geológico-minera, geoquímica y geofísica. De hecho, la línea de acción 4.3 del Programa Nacional de Desarrollo Minero 2001 – 2006 propuso la consolidación aún más del banco integral de datos denominado GeoInfo (actualmente GeoInfoMex). Este sistema es utilizado para integrar la información geológica minera y facilitar su difusión (DOF, 2003b).

Desde principios del sexenio de Salinas de Gortari comenzaron las reformas regulatorias, una de las más importantes fue la modificación del artículo 27 constitucional (1992) en diversos términos como la cancelación del derecho de reparto de tierra a los núcleos agrarios, la autorización a las sociedades mercantiles para apropiarse de lotes rústicos de hasta 25 veces el límite de la propiedad privada, la autorización para aprovechar tierras ejidales y comunales por terceras personas, la cesión de los derechos parcelarios y la adquisición del dominio pleno y la enajenación de parcelas (Gómez de Silva Cano, 2016, p. 156).

Salinas de Gortari en su libro *México un paso difícil a la modernidad*, menciona que el artículo 27 constitucional se reformó para satisfacer las necesidades de los campesinos después de la conclusión del reparto agrario. Los ejidatarios necesitaban tener dominio directo sobre la tierra para diversificar sus actividades y mejorar sus condiciones económicas (Salinas de Gortari, 2000, p. 683). La reforma agraria emprendida con la modificación de este artículo y la promulgación de la Ley Agraria (1992) trató de promover el desarrollo de la producción agropecuaria, la generación de empleos y otras opciones de ingresos como la renta de la tierra (Salinas de Gortari, 2000, pp. 683–684).

Esta reforma ratificó tres formas de propiedad en el campo, el ejido, la propiedad privada y la propiedad comunal. Además, propuso cambios en los atributos del ejido como la celebración de contratos de renta, de asociación o de venta, con los cuales pudo ingresar a la esfera mercantil (Salinas de Gortari, 2000, pp. 678 y 684). Con estas reformas, las

empresas mineras se establecieron en México a través de la compra de propiedades privadas, de la renta de terrenos ejidales y en algunos casos poco claros, de la adjudicación de terrenos nacionales.

En la renta de terrenos ejidales, la Asamblea Ejidal quedó establecida como el órgano supremo encargado de la “aprobación de los contratos y convenios que tengan por objeto el uso o disfrute por terceros de las tierras de uso común” (DOF, 2018f, p. 5 art. 23). Estos actos jurídicos generalmente son asimétricos debido a que la renta anual de la tierra no contabiliza la pérdida de la vocación original del suelo. Una característica que se pierde cuando se instala una mina, sin contar, que existe la posibilidad de que el predio también se degrade por acciones como el depósito de jales. Estas negociaciones también se consideran asimétricas porque los ejidatarios no poseen el conocimiento científico para evaluar la riqueza del subsuelo. Normalmente lo que ocurre es que los predios son evaluados monetariamente en correspondencia con sus características agrícolas, muy por debajo de las ganancias económicas que las empresas mineras obtienen.

Durante la primera generación de reformas estructurales también se promulgó la Ley Minera (1992) aún vigente, que terminó con las disposiciones de la Ley de Mexicanización de la Minería (1961), las cuales estaban encaminadas a romper con los monopolios, a promover la inversión nacional y el desarrollo de empresas paraestatales. Esta ley: i) retiró al Estado de la actividad minera; ii) eliminó restricciones al capital extranjero; iii) permitió la explotación de sustancias reservadas a la nación como el fósforo, el azufre, el hierro, el potasio y el carbón; iv) eliminó el tamaño máximo de la superficie de las concesiones; y v) amplió el tiempo de exploración y de explotación (DOF, 2003a, p. 17). El cuadro siguiente muestra una comparación de las últimas leyes mineras en varios aspectos concesionados como superficie, profundidad, tiempo y sustancias; donde se observa una tendencia a la eliminación de los límites de concesión.

Cuadro 7 Principales cambios efectuados en la Ley Minera de 1992 en comparación con las anteriores

Aspecto	Ley de Mexicanización de la Minería (1961)	Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en materia minera (1975)	Ley Minera (1992) reforma 11 de agosto de 2014
Alcance	Explotación y aprovechamiento	Exploración y explotación	Exploración y explotación
Sociedades de participación	Sociedades con 66 % de capital suscrito por mexicanos (artículo 5)	Sociedades con 51 % de capital suscrito por sociedades o personas mexicanas (artículo 5)	Sociedades constituidas conforme a las leyes mexicanas (artículo 10), sin importar que sea en su totalidad capital extranjero
Superficie de concesión	Para explotación concesiones de 500 hectáreas o menos (artículo 25) que en conjunto no excedan 3 000 hectáreas para oro, plata, cobre, plomo, zinc, entre otros metales y minerales (artículo 27)	Para exploración hasta 50 000 hectáreas (artículo 33) Para explotación concesiones de 500 hectáreas o menos (artículo 34) que en conjunto no excedan 5 000 hectáreas (artículo 35)	No se establece límite
Tiempo de concesión	Para explotación 25 años susceptibles de prorrogarse a tiempo indefinido si se comprueban obras de explotación (artículo 29) Para plantas de beneficio 25 años susceptibles de prorrogarse a tiempo indefinido si se cumple con la ley (artículo 53)	Para exploración 3 años, prorrogables a 3 años más (artículo 33) Para explotación 25 años, prorrogables a 25 años más (artículo 34)	Para exploración y explotación 50 años prorrogables a 50 años más si la concesión no fue cancelada (artículo 15)
Sustancias concesionadas	Se concesionan máximo 8 sustancias diferentes (artículo 24)	Se concesionan las que se mencionen en el título de concesión (artículo 33)	Se concesionan todos los minerales o sustancias sujetos a la Ley (artículos 4 y 16)

Fuente: elaboración propia con datos del Diario Oficial de la Federación (DOF) (1961, 1975, 1992b).

La eliminación de límites en varios aspectos concesionados implicó que las leyes ambientales también se avocaran a estas disposiciones sin considerar los impactos

ambientales que pudieran generarse.¹⁷ Así, por ejemplo, los cambios de uso de suelo hechos por las empresas mineras antes del inicio de operaciones tuvieron que establecerse sin límite de superficie alguno. Otro ejemplo es la inexistencia de límites de concesión de agua, las empresas pueden adquirir los títulos de concesión que requieran, basta con comprar los derechos de agua a particulares o adquirirlos del propio gobierno sino es una zona de veda.

A finales de 1993 se aprobó el TLC y el ACAAN. En un inicio el TLC fue visto como un instrumento que facilitaría la entrada de los productos mexicanos al mercado más grande del mundo y, enlazaría los asuntos ambientales y comerciales por primera vez en un acuerdo (Salinas de Gortari, 2017, p. 43). Uno de los artículos del TLC catalogados como un logro en la política ambiental es el 1114 (Salinas de Gortari, 2000, p. 401). En este artículo, los países firmantes no permiten alentar inversiones a través del debilitamiento de las normas ambientales internas. Esta disposición parece justa en un primer momento, no obstante, cuando se firma este tratado, la legislación ambiental mexicana se encontraba menos desarrollada que la de Canadá y Estados Unidos. Esta situación puso en desventaja a México, pero a la vez fue un atractivo para las empresas mineras de capital extranjero.

Las Partes reconocen que es inadecuado alentar la inversión por medio de un relajamiento de las medidas internas aplicables a salud o seguridad o relativas a medio ambiente. En consecuencia, ninguna parte debería renunciar a aplicar o de cualquier otro modo derogar, u ofrecer renunciar o derogar, dichas medidas como medio para inducir el establecimiento, la adquisición, la expansión o conservación de la inversión de un inversionista en su territorio (DOF, 1993a).

Por su parte el ACAAN apoyó las metas ambientales establecidas en el TLC. En este instrumento se propusieron muchas de las medidas gubernamentales para proteger el ambiente que hasta la fecha México ha tratado de cumplir (DOF, 1993b).

En la tercera etapa (1995-2000), el TLC aceleró la llegada de las empresas transnacionales, a pesar de que la crisis asiática disminuyó la cotización de los metales desde 1997 y hasta principios del siglo XXI (DOF, 2003a). En el cuadro siguiente se muestra

¹⁷ La Ley Minera en su artículo 12 establece que: “toda concesión, asignación o zona que se incorpore a reservas mineras deberá referirse a un lote minero, sólido de profundidad indefinida, limitado por planos verticales y cuya cara superior es la superficie del terreno, sobre la cual se determina el perímetro que comprende” (DOF, 2014c).

la evolución de la superficie concesionada, donde se puede apreciar un aumento de más del 30 % entre los años 1994 y 2000, en que pasó de 16.7 a 21.9 millones de hectáreas.¹⁸

Cuadro 8 Superficie concesionada durante el periodo 1994 – 2017 (miles de hectáreas)

Año	Títulos otorgados por año (número)	Superficie concesionada por año (miles de hectáreas)	Superficie total concesionada hasta ese año (miles de hectáreas)
1994	2 394	2 108.7	16 773
1995	1 516	2 209.3	18 810
1996	1 521	3 093.4	20 279
1997	2 106	9 906.2	21 119
1998	2 510	7 178.1	21 135
1999	1 992	7 496.8	21 845
2000	1 900	4 939.5	21 903
2001	2 170	2 559.4	19 376
2002	3 761	5 643.6	20 002
2003	2 560	2 378.3	20 966
2004	2 195	3 140.3	21 705
2005	2 904	6 634.6	22 249
2006	2 284	4 773.8	22 375
2007	2 423	8 377.9	24 398
2008	2 152	6 147.0	24 713
2009	2 327	7 411.0	24 753
2010	2 007	4 011.3	26 007
2011	2 022	4 429.0	27 022
2012	2 005	5 426.0	26 071
2013	1 154	2 168.6	26 002
2014	1 127	2 178.6	25 267
2015	774	1 670.9	25 506
2016	668	773.1	25 652
2017	687	964.1	24 945

Fuente: elaboración propia con datos de Presidencia de la República (2012, p. 251, 2018, p. 585). Nota: a partir del 2006 no es posible diferenciar entre títulos de exploración y explotación.

Durante los años noventa diversas disposiciones fueron revisadas y reformadas como parte de las reformas regulatorias emprendidas, y los avances en los cambios

¹⁸ Se denomina superficie minera vigente a la “amparada por concesiones mineras de exploración y explotación vigentes, más la amparada por solicitudes de concesión en trámite, menos las concesiones canceladas por desistimiento expreso de sus titulares o por incumplimiento de sus obligaciones” (DOF, 2003a).

estructurales. Dichas reformas tenían como principal meta ofrecer certidumbre legal a los inversionistas (OCDE, 2000, p. 18). Como parte de estas reformas, la Ley Minera fue modificada en 1996 para simplificar el proceso de otorgación de concesiones mineras a través de subastas (OCDE, 2000, p. 17).

Dicha otorgación de concesiones mineras se realiza a través de loterías de recursos mineros en las Delegaciones Federales de Minería ubicadas en ocho estados donde se incluye Zacatecas. Las últimas realizadas, iniciaron con la publicación de la declaratoria de libertad de terreno del 19 de febrero de 2019 en el DOF. En este comunicado se dio a conocer al público en general, la libertad de terreno de 95 lotes mineros (equivalentes a 132 358.5 hectáreas), los cuales en su momento fueron cancelados por desistimiento de su titular (DOF, 2019a). Las subastas se realizaron transcurridos treinta días naturales después de la publicación de esta declaratoria, en día hábil a las diez horas en las oficinas de las delegaciones implicadas. De manera simplificada, para realizar una subasta, las empresas o personas físicas adquieren las solicitudes que deseen para un lote de la declaratoria, a manera de boletos de lotería. El día de la subasta estas solicitudes son colocadas en una urna, y la última en salir es la ganadora de la concesión minera.

Tanto el SGM como las personas físicas o morales pueden adquirir una concesión minera en terrenos libres.¹⁹ En el caso del SGM se le denominan “asignaciones mineras”, las cuales estarán en posesión de esta institución por seis años o menos. El SGM en ese periodo tiene la obligación de realizar trabajos de exploración para cuantificar las reservas mineras (SGM, 2019d). Una vez desarrollado este trabajo, los lotes mineros son licitados por empresas (DOF, 2014e, p. 7 art. 15), quienes hasta el momento de iniciar la explotación, pagarán del 1 al 3 % de las regalías a esta institución (SGM, 2019d).

¹⁹ Se considera terreno libre el comprendido dentro del territorio nacional, con excepción del ubicado en o amparado por: zonas incorporadas o reservas mineras; concesiones y asignaciones mineras vigentes; solicitudes de concesiones y asignaciones mineras en trámite; concesiones mineras otorgadas mediante concurso y las derivadas de éstas que hayan sido canceladas; y los lotes respecto de los cuales no se hubieran otorgado concesiones mineras por haberse declarado desierto el concurso respectivo (DOF, 2014c, pp. 10–11 art. 14).

La investigación de lotes mineros para detectar yacimientos rentables por el SGM es una acción que también ha favorecido la apertura al gran capital, pues esta es la etapa más importante y decisiva para el establecimiento futuro de una mina. De acuerdo con ingenieros experimentados en exploración, de diez lugares que se exploran inicialmente, sólo uno pasa a la etapa adelantada, y de diez en etapa adelantada, sólo uno pasa a etapa de barrenación o perforación de la roca para extraer muestras minerales y poder determinar su viabilidad. El hecho de que subaste un lote minero ya con reservas probadas implica un gran ahorro en tiempo y dinero para la empresa ganadora.

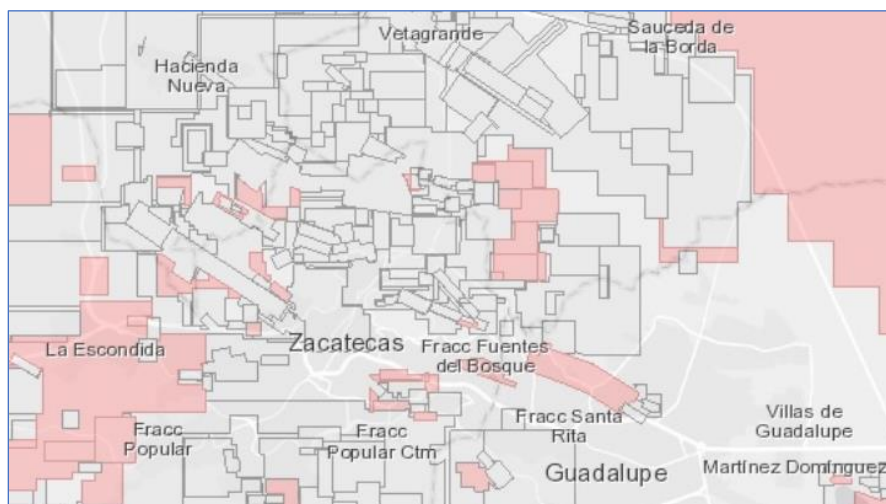
La cuarta etapa de desarrollo de las políticas neoliberales (2001 y años siguientes), según Cordera Campos y Lomelí Vanegas, muestra ya un agotamiento del impulso inicial de dichas reformas (2005, p. 5). En el caso de la minería este agotamiento se manifiesta en un aumento de los conflictos sociales y ambientales.

La reforma a la Ley Minera del 2005 amplió aún más la vigencia de las concesiones de exploración, al fusionarlas con las de explotación en un único permiso con una vida útil de 50 años prorrogable por 50 años más a conveniencia del titular (DOF, 2005b, p. 63 art. 15). Este acontecimiento facilitó aún más que las empresas mineras continuarán especulando con las concesiones mineras en las bolsas de valores. Este hecho se refleja en el estatus de los proyectos mineros extranjeros, de 1189 que existían hasta principios del 2019, sólo 99 (menos del 9 %) se encontraban en etapa productiva (SGM, 2019b). Por su parte, para el gobierno, una concesión es vista como una fuente de ingresos por los pagos solicitados anualmente, según lo establecido en la Ley Federal de Derechos (DOF, 2018i, pp. 208–209 arts. 262 y 263).

Si bien, la repartición agraria en México terminó durante el inicio del sexenio de Salinas de Gortari, la repartición del subsuelo continua hasta la fecha, pero con otro escenario. La repartición de tierras se desarrolló entre campesinos pobres, en tanto que la repartición de los yacimientos minerales se da entre grandes empresas mineras en su mayoría de capital extranjero. De acuerdo con la legislación vigente, el subsuelo puede ser concesionado a pesar de la existencia de infraestructura en la superficie. De manera particular la legislación minera no establece la profundidad a la cual deben iniciarse las

obras mineras bajo la superficie. La figura siguiente muestra una vista de la ciudad de Zacatecas, donde se observa que gran parte de su subsuelo se encuentra concesionado (polígonos en gris). Este hecho puede considerarse también un reflejo del desarrollo de las fuerzas productivas en la actividad minera, existe la tecnología que permite explotar yacimientos en el subsuelo sin llegar a afectar las obras civiles superficiales.

Figura 3 Polígonos mineros concesionados en la ciudad de Zacatecas



Fuente: impresión tomada de GeoInfoMex (SGM, s/f) el 22 de agosto de 2019.

La actividad minera ha sido la causa de un sinnúmero de conflictos sociales y ambientales por considerarse una actividad preferente sobre cualquier otro uso o aprovechamiento del terreno según el artículo 6 de la Ley Minera (DOF, 2014c, p. 3). Es de las pocas actividades productivas que pueden promover expropiaciones, ocupaciones temporales y la constitución de servidumbres en terrenos de particulares, ejidales o comunales (DOF, 2014e, p. 27 art. 50). En el caso de ocupaciones temporales y la constitución de servidumbres en propiedad particular, el artículo 51 del Reglamento de la Ley Minera menciona que cuando el afectado esta conforme, la Secretaria de Economía “resolverá favorablemente la ocupación temporal o constitución de servidumbre dentro de los quince días siguientes a la recepción de la solicitud una vez que reúna los requisitos previstos en el artículo 50 del presente Reglamento y sin necesidad de practicar visita”(DOF, 2014e, p. 28 art. 51). De lo contrario se iniciará un procedimiento administrativo que

resolverá esta secretaría en base a un dictamen técnico elaborado después del desahogo de una visita de inspección (DOF, 2014e, p. 29 art. 52).

En el caso de las expropiaciones a particulares, estas acciones se pueden solicitar bajo el amparo de la Ley de Expropiación (2012), la cual en su artículo 1 menciona que esta ley “tiene por objeto establecer las causas de utilidad pública y regular los procedimientos, modalidades y ejecución de las expropiaciones”(DOF, 2012a, p. 1 art. 1). Siendo una causa de utilidad pública el “desarrollo o aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de explotación” (DOF, 2012a, p. 2 art. 1). Un artículo polémico debido a que la acción de expropiar para explotar los recursos naturales es una causa de utilidad pública, en tanto que, expropiar para preservar el ambiente y, con ello, garantizar la sustentabilidad, no lo es.

En caso de tratarse de ejidos o terrenos comunales, las expropiaciones, las ocupaciones temporales y la constitución de servidumbres se realizarán conforme a lo establecido en la Ley Agraria a cargo de la Secretaría de la Reforma Agraria (DOF, 2014e, p. 28 art. 50 y 51). Dicha ley en su artículo 93 menciona que los terrenos ejidales y comunales pueden ser expropiados por varias causas de utilidad pública, donde se encuentra la explotación de elementos naturales pertenecientes a la Nación y la instalación de plantas de beneficio asociadas a dichas explotaciones (DOF, 2018f, p. 18 art. 93).

Si bien la expropiación de un bien no es un procedimiento sencillo, pues debe estar avalado por el Poder Ejecutivo Federal y culminar con un decreto presidencial publicado en el DOF, sigue siendo un recurso real para la actividad minera.

Por su parte, comunidades enteras continúan enfrentándose a los estragos de la actividad minera. Tal es el caso de la comunidad de Salaverna ubicada en el municipio de Mazapil, Zacatecas, donde los habitantes afirman ser poseedores de estas tierras desde varias generaciones atrás. Sin embargo, la empresa Minera Tayahua del grupo Minera Frisco se posicionó en este lugar desde 1998, alegando que tuvo un acuerdo comercial con la empresa Grupo Industrial de Coahuila, quien le vendió la concesión minera y una superficie de 3 584 hectáreas de tierra donde se ubican las comunidades de Salaverna, Las Majadas y

Santa Olaya. Minera Frisco pagó 775.6 pesos por hectárea en esta transacción (Arteaga Domínguez, 2019).

Actualmente, estas comunidades solicitan al gobierno federal vía la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) el reconocimiento de la posesión originaria de la tierra de un polígono de 4 650 hectáreas donde se encuentra Minera Tayahua y las comunidades mencionadas. La SEDATU debe determinar si se trata de terrenos nacionales que no fueron adjudicados, y quien tiene el derecho de posesión de dichas tierras. Por lo pronto el Registro Agrario Nacional (RAN) acreditó que el polígono de las 4 650 hectáreas no pertenece a ningún núcleo de población agrario ni ejidal ni comunal, al parecer son terrenos nacionales que no fueron repartidos en su momento (Arteaga Domínguez, 2019).

Los registros públicos de la propiedad de Concepción del Oro, Zacatecas, y de Saltillo, Coahuila, han informado en reiteradas ocasiones que no existe ningún antecedente registral traslativo de la escritura de la empresa Minera Frisco. Por su parte, la empresa Minera Tayahua trató de reubicar a las familias de campesinos, quienes no estuvieron de acuerdo en las condiciones ofertadas, por lo que la empresa con apoyo del gobierno comenzó a presionarlos (Arteaga Domínguez, 2019).

La SEMARNAT a través de la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA) cuando aprueba el trámite de la manifestación de impacto ambiental de este proyecto, está de acuerdo con los criterios utilizados para seleccionar el sitio, como la reubicación de la población (DGIRA, 2010, p. 16). Si bien es cierto que los aspectos socio económicos no son competencia de esta secretaría, cuando se presenta una manifestación de impacto ambiental, ésta tiene la obligación de velar por la mejor gestión de los impactos que provocará el proyecto.

25. Que en el ámbito económico del área del proyecto, éste será un generador de impactos positivos al crear empleos, no previendo la promovente conflictos de tipo social en el área porque la localidad de Salaverna comprende una población muy pequeña (54 familias actualmente), donde el 53 % de los núcleos familiares se ubican en terrenos de propiedad, pretendiendo por ello pagarles y reubicarlos a cabeceras municipales de Mazapil y Concepción del Oro, según decidan los habitantes, donde contarán con mejores servicios (DGIRA, 2010, p. 16).

Otro caso de interés donde la actividad minera doblegó la protección del ambiente ocurrió cuando el gobernador del estado de Zacatecas Alejandro Tello frenó el proyecto para declarar 2 577 126 hectáreas del semi desierto zacatecano como área natural protegida bajo la categoría de Reserva de la Biosfera. Un proyecto que pretendía proteger el hábitat del águila real y otras especies en estatus de protección como el perrito de la pradera, la víbora de cascabel y el oso pardo. En su momento se argumentó que el proyecto sería cancelado porque afectaría los intereses de la actividad minera, una de las principales fuentes económicas de este estado (Página 24, 2016).

A pesar de que se han consolidado procedimientos administrativos y penales para acceder a la justicia ambiental en México, autores como Ibarra Barreras y Moreno Vázquez los catalogan repletos de excepciones dilatorias y carentes de principios consagrados en la Constitución. Además, consideran que las autoridades que los dirigen, siempre están en la búsqueda de causales de improcedencia para evitar pronunciarse a favor de los afectados. El derrame de 40 mil metros cúbicos de lixiviados de sulfato de cobre acidulado generado por la Compañía Buenavista del Cobre el 6 de agosto de 2014, es un ejemplo fehaciente de estos procedimientos. Los compromisos asumidos por la empresa y el gobierno federal no habían sido atendidos a tres años de la tragedia (Ibarra Barreras & Moreno Vázquez, 2017, p. 152).

El derrame de ácido sulfúrico en el Mar de Cortés en la Unidad Terminal Marítima de Guaymas del pasado 9 de julio de 2019 a cargo de Mexicana del Cobre (El Universal, 2019), también habla de una gestión ambiental poco efectiva. Las investigaciones dilucidaron que esta empresa minera no poseía manifestación de impacto ambiental, a pesar de que el ácido sulfúrico es una sustancia peligrosa.

Históricamente, las empresas mineras en México no han pagado impuestos por la emisión de contaminantes. El ex presidente Vicente Fox propuso por primera vez una iniciativa al respecto denominada Ley de Impuestos Ambientales (2003), la cual no fue aprobada. Esta propuesta de ley contemplaba cobros por contaminación con sustancias químicas persistentes o industriales tóxicas, deterioro de los ecosistemas forestales y pérdida de componentes de la biodiversidad. No obstante, fue poco difundida y discutida,

y se desechó por contradicciones en su estructura, como el cobro de impuestos por la emisión de sustancias prohibidas (Figueroa Neri, 2005, pp. 1008–1009).

En la actualidad, Zacatecas ha sido uno de los primeros estados que ha propuesto el cobro de impuestos ecológicos, no sólo a las empresas mineras sino a todas aquellas que contaminan o participan como proveedores en el manejo de residuos peligrosos (Periódico Oficial del Estado de Zacatecas, 2018). La sesión pública ordinaria de la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) del 11 de febrero del 2019 declaró constitucionalmente válidos estos impuestos, aunque aún se discute la manera como se operativizarán (SCJN, 2019). Sonora es otro Estado que ha propuesto una iniciativa de ley para cobrar impuestos ecológicos a las empresas que contaminen (Proyecto Puente, 2019). Michoacán también lo hizo, sin embargo, ante la presión ejercida por el sector privado, el congreso local acordó cancelarlos (El Financiero, 2019).

En esta cuarta etapa, el desarrollo de la cartografía nacional continúa en marcha. Las empresas mineras hacen uso de un sinnúmero de productos disponibles para explorar regiones de interés. Dentro de los que se encuentran imágenes de satélite o mosaicos, ortofotos, y cartografía de diversos temas. De acuerdo con el informe presidencial 2017, hasta ese año, la cartografía 1:50 000 abarcaba casi el 44 % del territorio nacional, en tanto que la cartografía 1:250 000 terminó desde el 2005. En el cuadro siguiente se presentan los kilómetros cuadrados (km²) de cartografía elaborada durante los años 1994-2017. El SGM estima que se ha tomado y analizado una muestra geológica por cada 5 km² (SGM, 2019d).

Cuadro 9 Cartografía elaborada por el SGM durante el periodo 1994 - 2017

Año	Cartografía a escala 1:250 000 (km ²)	Cartografía a escala 1:50 000 (km ²)	Cartografía aerogeofísica (km)
1994	-	-	56 521
1995	22 930	30 953	96 317
1996	225 809	8 667	96 048
1997	282 521	4 821	101 436
1998	389 747	40 334	246 905
1999	336 693	40 134	316 833
2000	196 157	80 319	300 320
2001	106 734	20 117	190 777
2002	52 545	35 629	190 375
2003	117 672	38 802	281 535
2004	118 226	44 400	169 350
2005	108 552	33 550	85 190
2006	-	46 021	200 846
2007	-	48 106	236 915
2008	-	37 030	209 734
2009	-	33 704	177 327
2010	-	40 422	176 545
2011	-	41 005	108 884
2012	-	43 023	184 426
2013	-	35 680	149 634
2014	-	30 317	151 545
2015	-	33 160	104 960
2016	-	35 173	114 877
2017	-	38 536	94 869
Total	1 957 586	861 234	4 083 331

Fuente: elaboración propia con datos de la Presidencia de la República (2018, p. 585). Nota.- El SGM sustituyó el termino cartografía aeromagnética por aerogeofísica, ya que incorporó dos nuevos métodos: el electromagnético en el dominio del tiempo y el hiperespectral.

Actualmente, la información geológica minera se concentra en dos instancias a cargo del SGM, la primera es el sistema de consulta de información geo científica denominado GeolInfoMex, disponible en línea. Este sistema posee más de 80 capas de información, las cuales han sido recabadas por más de siete décadas. Aparte de cartografía concentra información de yacimientos minerales, concesiones mineras, ejidos, áreas naturales protegidas, entre otras cuestiones (SGM, 2019c). La otra instancia de información es el Centro de Documentación en Ciencias de la Tierra (CEDOCIT) que cuenta con áreas para consulta de información (biblioteca, mapoteca y archivo técnico) y recepción de muestras para laboratorio.

Gran parte de los servicios informativos que oferta el SGM no poseen costo alguno, excepto aquellos servicios que implican el uso de algún equipo físico o son estudios de caso como las manifestaciones de impacto ambiental. Dentro de estos servicios se encuentra también la certificación de reservas mineras. Un requerimiento de las instituciones bancarias para promover operaciones financieras a nivel nacional o para la compra o venta de minas (DOF, 2014c, p. 7 art. 9). En México pocas actividades productivas como la minería posee una institución gubernamental como lo es el SGM, un organismo descentralizado cuya principal actividad es proveer de información a las empresas mineras para su mejor establecimiento y beneficio económico.

Pese a que se avecinan cambios en la Ley Minera y se prevé que estos serán más severos según lo informó el senador y líder del Sindicato Minero Napoleón Gómez Urrutia (Milenio, 2019), el panorama no se muestra alentador. Esta actividad no sólo es regulada por la Ley Minera, existen otros instrumentos legales tales como el TLC. En general, los tratados dentro de su estructura aparte de incluir acuerdos, adjuntan disposiciones y procedimientos para dirimir controversias. Un aspecto que pudiera considerarse idóneo en un primer momento, sin embargo, puede acarrear desventajas para los países firmantes menos desarrollados y con estructuras jurídicas ineficientes como es el caso de México. Los inversionistas extranjeros pueden obtener ventajas de estas deficiencias y demandar a los gobiernos en los tribunales supranacionales como el Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (CIADI) del Banco Mundial o la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI) (Moore & Pérez Rocha, 2019, p. 11).

Moore y Pérez Rocha en su informe el *Casino del Extractivismo* analizan 38 demandas de empresas extranjeras, de las cuales 20 se relacionan con la implementación de normas ambientales y de minería (2019, p. 17). Dentro de estos casos se encuentra la demanda de la empresa estadounidense Odyssey Marine Exploration, Inc. (Odyssey), quien reclama la negativa a autorizar la manifestación de impacto ambiental del proyecto Don Diego por parte de la SEMARNAT. Un proyecto que pretendía instalar una mina submarina para extraer fósforo en las costas de Baja California Sur a través de la subsidiaria

Exploraciones Oceánicas, S. de R.L. de C.V. Según Odyssey, el gobierno mexicano violó los artículos 1102 (trato nacional), 1105 (nivel mínimo de trato) y 1110 (expropiación e indemnización) del TLC (Pie de Página, 2019).

Este caso y muchos otros han obligado a México a pagar sumas millonarias, que ponen en alerta la necesidad de reestructurar el sistema jurídico minero desde la federación. El desarrollo de políticas locales o estatales contra la minería puede ser causa de demandas ante los tribunales supranacionales. Artículos como el 1102 del TLC que propone un trato no menos favorable para los inversionistas extranjeros en relación con los nacionales (DOF, 1993a, p. art. 1102), pone de manifiesto que el cobro de impuestos ecológicos a nivel estatal pudiera ser objeto de demandas. Dado que las condiciones de operación de una empresa minera no serían las mismas en un estado que en otro.

Cada una de las Partes otorgará a las inversiones de inversionistas de otra Parte, trato no menos favorable que el que otorga, en circunstancias similares, a las inversiones de sus propios inversionistas en el establecimiento, adquisición, expansión, administración, conducción, operación, venta u otra disposición de las inversiones (DOF, 1993a, p. art. 1102).

Uno de los aspectos que se pretende cambiar con la nueva reforma a la Ley Minera es el tiempo de duración de las concesiones, se pretende pasar de 50 a 20 años. Gómez Urrutia comentó que “ los yacimientos no duran más de 20 años y hay que regular todo ello porque se daña al medio ambiente y a las personas” (Milenio, 2019). Un tema polémico si se visualiza desde varias aristas. En primer lugar, la vida de un yacimiento es impredecible, si bien en la etapa de exploración se cuantifican las reservas mineras, siempre existe la posibilidad de que la vida del yacimiento se alargue o se acorte. Un ejemplo muy típico es la mina Fresnillo propiedad de Fresnillo plc, la cual ha sido explotada desde 1554 y aún continua en operación. Segundo, el desarrollo tecnológico actual permite explotar y beneficiar el mineral a velocidades inimaginables, estas dimensiones por más que se proteja el ambiente y las comunidades tienen efectos en la naturaleza y en las personas. Por último, gran parte de impactos ambientales generados en la actividad minera tienen un largo alcance en el tiempo y en el espacio, por lo que si se reduce el tiempo de concesión habría que responder las preguntas: ¿quién va a monitorear los impactos ambientales en un largo

plazo?, sobre todo si la mina se ubica dentro de una comunidad y, ¿cuál será el destino de las tierras impactadas por la minería cuya vocación forestal se ha perdido?

En conclusión, las políticas neoliberales en México han convertido a la minería en una actividad prioritaria sobre otras actividades. Es notable que el desarrollo de las fuerzas productivas ha hecho posible el concesionamiento del subsuelo independientemente de lo que exista en la superficie, por ejemplo, una colonia o un ejido. De hecho, ciudades como Zacatecas se encuentran en gran medida concesionadas en el subsuelo. Empero este suceso ha dado lugar al desarrollo de conflictos sociales entre las comunidades y las empresas mineras, las cuales han tratado de ejercer el derecho de propiedad bajo cualquier circunstancia.

Las reformas a la legislación minera y el desarrollo de legislaciones como la ambiental han protegido los intereses económicos de las empresas mineras. Los sucesos de mayor trascendencia en la minería desde el inicio de las políticas neoliberales han sido: i) la venta de empresas mineras paraestatales; ii) la desincorporación de reservas minerales para asegurar suficientes recursos minerales a las empresas nacionales y extranjeras; iii) la desregulación del ejido, para facilitar la apropiación de tierras; iv) la eliminación de los límites de concesión para garantizar la permanencia de las empresas extranjeras; v) la apertura en gran medida gratuita a la información geológica nacional; vi) licitaciones de yacimientos con reservas mineras probadas por el SGM; vii) el otorgamiento de certidumbre legal a las todas las sociedades mineras incluyendo aquellas de capital extranjero, viii) la disminución de los costos de operación a través de la externalización de los impactos ambientales; y xi) la simplificación administrativa en el otorgamiento de concesiones mineras, a través de subastas de recursos minerales.

3.2 La producción de metales en el mundo

Es innegable la importancia que han tenido los minerales en el desarrollo de la sociedad humana. Sin embargo, su producción es objeto cada vez más de un grupo de grandes empresas mineras capaces de invertir grandes capitales en todos los rincones del mundo. A pesar de que la explotación de minerales combustibles, ferrosos, no ferrosos, preciosos e

industriales es una actividad propia de la mayoría de los países en el mundo, los países en vías de desarrollo (según la clasificación de UN) siguen siendo los que más recursos minerales aportan.²⁰ Así, para el 2017, estos países donde se incluye China, México, Brasil, Perú, Chile, India y Sudáfrica, produjeron casi el 59 % de los minerales del mundo, seguidos de los países desarrollados como Canadá, Rusia, Australia y Estados Unidos con un 27 %, el resto se atribuye a los países en transición y poco desarrollados (BMNT, 2019, p. 34).

En orden consecutivo, China, Estados Unidos, Rusia y Australia son considerados los principales países productores de minerales (BMNT, 2019, p. 28). Por su parte, Asia una región que desde finales del siglo pasado ha mantenido una tendencia al alza en la producción de minerales, se sitúa como el primer continente productor, seguido por Norteamérica (BMNT, 2019, p. 25). El cuadro siguiente muestra que para el 2018, China se sigue manteniendo como el primer productor de oro, plomo y zinc. En tanto que México y Chile continúan conservando el primer lugar en producción de plata y cobre, respectivamente.

²⁰ La clasificación de los países según su grado de desarrollo puede ser vista en <https://unstats.un.org/unsd/methodology/m49/>

Cuadro 10 Producción minera mundial por tipo de metal y principales países productores

2018

Metal y su producción mundial	Principales países productores	Porcentaje	Porcentaje total
Oro 3 503 toneladas	China	12.3	51.3
	Australia	9.5	
	Rusia	9.0	
	Estados Unidos	6.4	
	Canadá	5.7	
	Perú	4.4	
	Ghana	4.0	
Plata 26 616 toneladas	México	23.0	53.3
	Perú	16.9	
	China	13.4	
Cobre 21 millones de toneladas	Chile	27.6	52.3
	Perú	11.4	
	China	7.6	
	Estados Unidos	5.7	
Zinc 12.9 millones de toneladas	China	34.3	54.3
	Perú	11.5	
	Australia	8.5	
Plomo 4.65 millones de toneladas	China	44.6	55.1
	Australia	10.5	

Fuente: elaboración propia con datos de CAMIMEX (2019b, pp. 36, 40, 44, 47 y 50), The Silver Institute (2019, p. 81) y Metal Focus (2019, p. 6).

Desde inicios del presente siglo, la producción mundial de oro ha tenido una tendencia al alza, a pesar que algunos analistas comentan que el pico de extracción de este metal ya fue rebasado. Los países en vías de desarrollo suministraron más del 50 % de este metal durante el periodo 2013 – 2017, en tanto que los países desarrollados aportaron el 23 % (BMNT, 2019, p. 78). En el cuadro siguiente se presenta la evolución del suministro y la demanda de este metal durante los últimos nueve años.

Cuadro 11 Suministro y demanda del oro 2010 – 2018 (toneladas)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Variación últimos dos años
Suministro										
Producción minera	2794	2881	2959	3118	3203	3290	3397	3442	3503	2 %
Reciclaje	1502	1635	1680	1247	1188	1121	1282	1156	1168	1 %
Oferta de cobertura neta	-	32	-	-	105	13	33	-	-	n/a
Total	4296	4549	4639	4365	4496	4424	4712	4598	4671	2 %
Demanda										
Fabricación de Joyería	2117	2185	2213	2766	2543	2478	2017	2255	2282	1 %
Demanda industrial	411	385	363	350	348	332	323	333	335	1 %
Inversiones físicas de oro	1141	1401	1300	1718	1060	1072	1061	1036	1078	4 %
Demanda de cobertura neta	118	-	47	25	-	-	-	24	12	-49 %
Compras para reserva monetaria por el sector oficial	104	516	582	646	584	577	390	377	657	74 %
Total	3893	4487	4506	5504	4535	4458	3791	4025	4364	8 %

Fuente: Metals Focus (2019, p. 6), traducción propia.

En lo que respecta al suministro, la producción minera de oro alcanzó un récord de 3 503 toneladas en el 2018, aumentó un 25.4 % respecto del 2010. Sin embargo, esta vía no es la única forma de suministro de este metal, el reciclaje también es importante. El 25 % del oro fue suministrado por esta vía para el 2018, un porcentaje menor que el 36 % del 2012, el año más próspero.

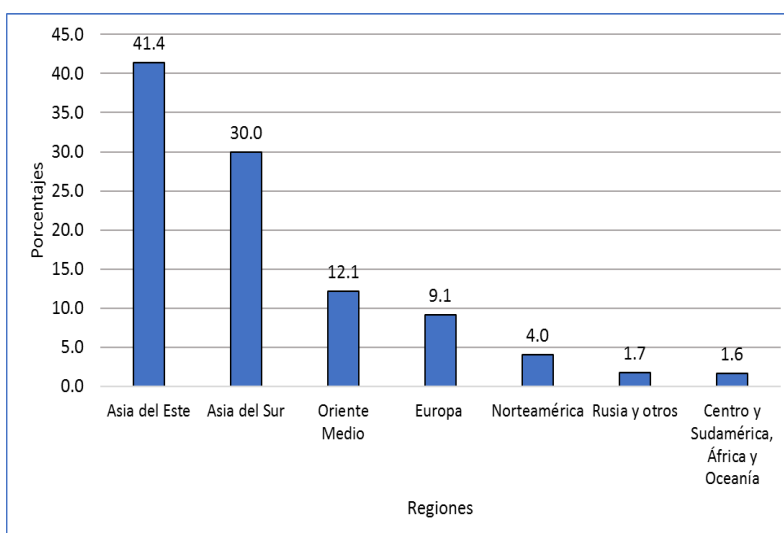
Una de las consecuencias de la guerra comercial entre Estados Unidos y China por el liderazgo económico y tecnológico del mundo, ha sido la compra desmedida del oro. De acuerdo con el cuadro anterior, las compras para reserva monetaria por el sector oficial aumentaron un 74 % del 2017 al 2018. Con esta acción, países como Rusia y China tratan de alejarse de la economía estadounidense cimentada en el dólar y en los bonos del tesoro. El 2018 fue el año de mayor compra de este metal durante los últimos 50 años, y se espera que la compra de oro continúe al alza (Oroinformación, 2019). Un análisis de las reservas de los bancos centrales muestra que Rusia y China aumentaron sus reservas de oro un 306 y un 209 % durante el periodo 2008-2018 (Metals Focus, 2019, p. 92).

El principal destino del oro es la fabricación de joyas seguido de la inversión física y el respaldo de la moneda. La gran estabilidad química de este metal, su baja concentración

en la corteza terrestre y el tiempo de trabajo que el ser humano invierte en su exploración, extracción y beneficio, lo han hecho el equivalente general a nivel mundial. Es un metal que exhibe la fortaleza artística y económica de un país, y su valor es reconocido en cualquier parte del mundo.

Durante la última década, la fabricación de joyas demandó el 50 % o más de este metal. Específicamente, el 2018 demandó un 52.3 %, un poco menos que el 2014, el año más próspero en esta actividad con un 56 %. Asia del Este es la primera región productora de joyas de oro en el mundo, siendo China el principal fabricante, quién para el 2018 produjo el 32 % de las joyas en el mundo. A esta región le sigue Asia del Sur, donde se ubica la India, el segundo país fabricante de joyas con un 28 % (Metals Focus, 2019, p. 41). En contraparte, los principales países consumistas de joyas son también China e India (Metals Focus, 2019, p. 39). En la gráfica siguiente se muestran los porcentajes de fabricación de joyería de oro por regiones.

Gráfica 4 Fabricación de joyería de oro por regiones 2018



Fuente: elaboración propia con datos de Metals Focus (2019, p. 41).

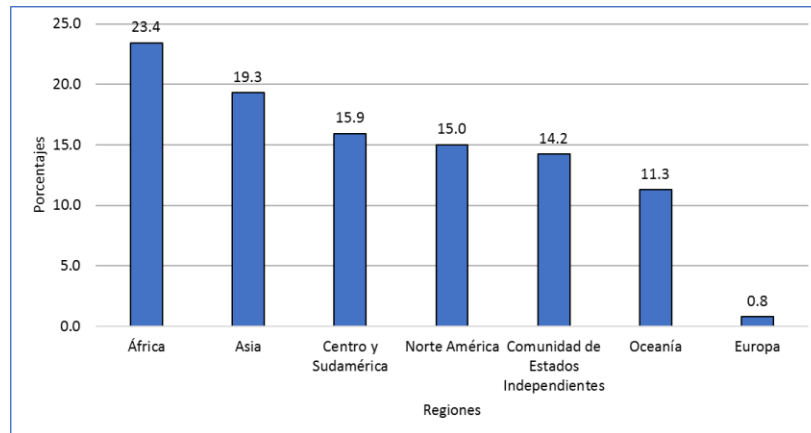
La demanda industrial del oro en 2018 (335 toneladas) se dividió de la manera siguiente: 80.1 % para la fabricación de electrónicos, 15.3 % para fines decorativos y otras aplicaciones industriales y 4.6 % para fines dentales (Metals Focus, 2019, p. 52). A pesar de que el oro es un metal con menor demanda industrial que la plata, tiene importantes

aplicaciones en la fabricación de componentes electrónicos como el desarrollo de la memoria flash y de la memoria RAM. La primera se relaciona en el desarrollo de unidades en estado sólido para el almacenamiento de datos y, la segunda, impulsa el desarrollo de elementos de Industria 4.0 como big data, servicios en la nube y aplicaciones de Internet de las cosas (IoT), así como la minería de criptomonedas. El oro en la industria también tiene importantes aplicaciones en el desarrollo de infraestructura 5G y sus equipos relacionados, y en el sector automotriz (Metals Focus, 2019, p. 50). Los países que más demandaron oro para fabricar componentes electrónicos por orden de importancia fueron Japón, China en asociación con Hong Kong, y Estados Unidos (Metals Focus, 2019, p. 50).

Es notable que China ha superado a Estados Unidos en lo que a producción de tecnología se refiere. Este país presentó el 43 % de las solicitudes de patentes mundiales para el 2016, una cifra que superó el 19 % de Estados Unidos (CEPAL, 2018, p. 53). Las empresas tecnológicas chinas Huawei y ZTE presentaron el mayor número de patentes en el marco del Tratado de Cooperación en Materia de Patentes de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) en el 2017. El déficit comercial de bienes de los Estados Unidos con China en este año, se registra en productos electrónicos, equipos eléctricos y manufacturas misceláneas, en tanto que Estados Unidos sólo registra superávits en el comercio de servicios y sectores ligados a los recursos naturales (CEPAL, 2018, p. 54).

Si se analiza la producción de oro por regiones, África fue el principal territorio productor durante el 2018, por si solo aportó la quinta parte del oro producido en el mundo. Los principales países productores en esta región fueron Ghana y Sudáfrica. En conjunto África y Centro y Sudamérica, países en vías de desarrollo, produjeron casi el 40 % del oro en el mundo en este año. En el caso de Centro y Sudamérica, una región que produjo el 15.9 % del oro en el mundo, los principales países productores fueron Perú y Brasil (Metals Focus, 2019, p. 18). En la gráfica siguiente se muestran los porcentajes de producción por región para el 2018.

Gráfica 5 Producción de oro por regiones mundiales durante el 2018



Fuente: elaboración propia con datos de Metals Focus (2019, pp. 18–19).

A nivel mundial, las principales veinte empresas productoras de oro, produjeron más del 37 % de este metal durante los años 2017 y 2018. A la vanguardia se sitúa Newmont mining (fusionada con Goldcorp en abril de 2019) seguida por Barrick Gold y AngloGold Ashanti, con una producción de más de 100 toneladas de oro por año. A estas le siguen Kinross Gold, Polyus Gold International, Freeport McMoRan, Newcrest Mining, Goldcorp, Navoi MMC, Gold Fields y Agnico Eagle Mines, con una producción mayor a 50 toneladas de oro por año (Metals Focus, 2019, p. 20).

En el anexo 4 se presentan las treinta las minas más productivas de oro en el mundo, las cuales en conjunto produjeron el 21 % (737.3 toneladas) de este metal en el 2018. En Australia, el segundo país productor de oro, se ubican cinco de estas grandes minas, en Rusia, el tercer productor, dos minas, y en Estados Unidos, el cuarto productor, tres minas. China no posee ninguna de las minas más productivas en el mundo, a pesar de ser el primer productor de oro. En conjunto son cinco empresas las que controlan 17 de estas minas: Barrick Gold, Newmont Mining, AngloGold Ashanti, Kinross Gold y Polyus Gold.

En México también se ubica una de las minas más productivas de oro en el mundo, tal es el caso de La Herradura. Una mina ubicada en el estado de Sonora que pertenece a Fresnillo plc, con una ley de reserva mineral de 0.79 g/t de oro (Peñoles, 2018, p. 42). Otras minas importantes productoras de oro en este país se presentan en el apartado siguiente.

Los costos de producción de una onza de oro varían de yacimiento a yacimiento, de empresa a empresa y de región a región, en general, dependen de diversos factores como el costo de la mano de obra, los insumos, la maquinaria, los combustibles, la energía eléctrica, la fertilidad natural de la mina, y las políticas económicas y ambientales de cada país. A pesar que desde el 2012 se tenía una tendencia a la baja en los costos totales para producir una onza de oro, durante los últimos dos años estos aumentaron (Metals Focus, 2018, p. 28). El cuadro siguiente muestra los costos de producción “*All-in sustaining and Total Cash*” de una onza de oro en distintas regiones del mundo.²¹ Normalmente, los costos de producción de una onza de oro pueden disminuir cuando el dólar se fortalece y se devalúan las monedas locales, reduciendo con ello los precios locales. Esto no ocurrió así en el 2018. La mayoría de los principales países productores de oro tuvieron aparte de las devaluaciones, altas tasas de inflación, lo que provocó un aumento en los precios locales, con excepción de Australia y Rusia (Metals Focus, 2019, p. 24).

Como se observa en el cuadro siguiente, Europa y África fueron las regiones donde costo más producir una onza de oro. Posiblemente esto se debe a que las políticas ambientales y económicas de Europa son más estrictas que en otras regiones del mundo. En el caso de África, según los analistas, los altos costos de producción de una onza de oro se debieron a paros en las operaciones mineras de Tanzania y Sudáfrica por disputas arancelarias y laborales. Además que, el Rand Sudafricano se fortaleció ligeramente frente al dólar interanual, lo que provocó un aumento de la mano de obra y de la electricidad en la zona (Metals Focus, 2019, p. 25).

²¹ “The “all-in sustaining costs” is an extension of existing “cash cost” metrics and incorporate costs related to sustaining production. The “all-in costs” includes additional costs which reflect the varying costs of producing gold over the life-cycle of a mine. It is up to individual companies to determine how they report to the market and to decide whether their stakeholders will find these new metrics of value in understanding their businesses; it is expected that, since many companies report on a calendar year basis, they may choose to use these metrics from 1 January 2014” (FinNotes, 2020).

Cuadro 12 Costos totales de producción de una onza de oro por región

Región	2017		2018		Variación All-in sustaining
	Total Cash	All-in sustaining	Total Cash	All-in sustaining	
Europa	751	1 010	718	1 011	0 %
África	785	995	811	1 001	1 %
Norteamérica	616	862	678	943	9 %
Centro y Sudamérica	599	866	625	893	3 %
Oceanía	651	861	641	843	-2 %
Asia	494	705	575	796	13 %
Comunidad de Estados Independientes	487	725	526	747	3 %
Costos globales	650	881	681	906	3 %

Fuente: Metals Focus (2019, p. 24), traducción propia.

El siguiente metal que se analiza en este apartado es la plata. Los países en vías de desarrollo proporcionan la mayor cantidad de este metal en el mundo, dentro de los que destacan México, Perú y China. Estos países suministraron el 73 % de la plata para el 2017, en tanto que los países desarrollados sólo aportaron el 17 % (BMNT, 2019, p. 81).

El cuadro siguiente muestra un análisis del suministro y la demanda de este metal durante el periodo 2009 – 2018, donde se observa que su producción decayó ligeramente durante los últimos tres años después de trece años de auge ininterrumpidos (The Silver Institute, 2019, p. 26). La baja de este metal en el 2018 se atribuye a una disminución de la producción en países como Guatemala, India, China y Argentina y Canadá (The Silver Institute, 2019, p. 10).

Cuadro 13 Suministro y demanda de la plata 2009 - 2018 (toneladas)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Suministro										
Producción minera	22312	23442	23587	24625	25607	26993	27798	27789	27276	26616
Ventas netas de los gobiernos	486	4375	374	229	245	0	0	0	0	0
Reciclaje	6239	7066	8123	7894	5948	5207	4672	4721	4783	4707
Oferta de cobertura neta	(541)	1569	381	(1464)	(1081)	521	244	(603)	58	(86)
Suministro total	28495	33431	32465	31284	30719	32721	32713	31907	32116	31237
Demanda										
Joyería	5502	5909	5956	5808	6835	7068	6945	6306	6362	6611
Monedas y barras	2476	5416	6584	5015	7486	7267	9131	6491	4679	5637
Platería	1654	1613	1476	1363	1844	1903	1967	1628	1793	1900
Usos industriales	16427	19715	20312	18664	18805	18548	18122	17617	18221	17997
....eléctrico y electrónico	7072	9367	9044	8295	8274	8208	7652	7275	7563	7730
....soldadura y aleaciones	1674	1905	1965	1900	1981	2073	1912	1721	1789	1805
....fotográficos	2377	2098	1905	1687	1569	1508	1433	1390	1273	1222
....energía solar	0	0	2095	2002	1704	1675	2005	2331	2764	2503
....óxido de etileno	148	272	194	148	239	154	317	317	214	169
....otros usos industriales	5156	6073	5108	4631	5038	4930	4804	4583	4617	4569
Demanda física	26059	32653	34328	30850	34969	34787	36166	32043	31054	32146
Excedente físico / déficit	2436	778	(1863)	434	(4250)	(2066)	(3452)	(136)	1063	(909)
ETF Creación de inventario	4880	4027	(747)	1720	77	44	(552)	1548	74	(631)
Construcción de inventario de intercambio	(475)	(231)	378	1934	273	(166)	392	2482	1602	2215
Balance neto*	(1970)	(3018)	(1494)	(3220)	(4601)	(1944)	(3292)	(4165)	(614)	(2493)
Precio de la plata (dólares por onza)	14.67	20.19	35.12	31.15	23.79	19.08	15.68	17.14	17.05	15.71

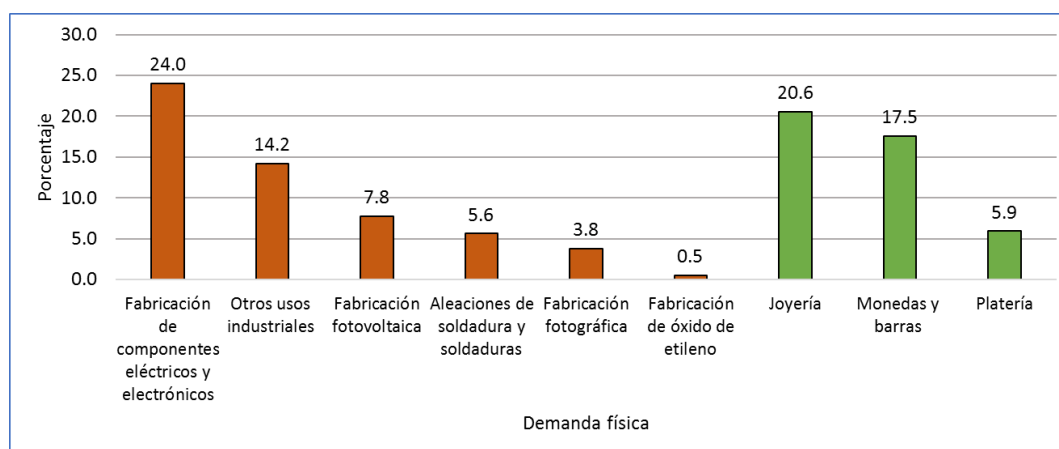
Fuente: The Silver Institute (2019, p. 79), traducción propia.* Antes del 2011, la demanda del sector fotovoltaico se incluyó en otros usos industriales.

Al igual que el oro, el reciclaje de la plata es una vía importante de suministro. En la última década, el año que más aportó plata por esta vía fue el 2012, con un suministro de 7 894 toneladas (25.2 %), comparado con el 2015, el año de menor reciclaje, con una aportación de 4 672 toneladas (14.3 %). En el 2018, el 15.1 % de la plata se suministró por esta vía, siendo Asia y Europa, los continentes que reciclaron el 72 % de este metal (The Silver Institute, 2019, pp. 79, 82 y 83).

El año que más demandó plata durante la última década fue el 2015, luego hubo un declive de dos años que mejoró el pasado 2018 con un aumento del 4 % respecto del 2017. Esta leve recuperación fue impulsada por un aumento en la inversión minorista de barras y

monedas, y en la demanda para fabricar joyas y platería (The Silver Institute, 2019, p. 10). Estos incrementos compensaron la disminución de la demanda de plata en la elaboración de paneles solares, las aplicaciones fotográficas y la fabricación de óxido de etileno. Por su parte, la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos aumentó por segundo año consecutivo, al igual que la fabricación de aleaciones y soldaduras alcanzó un máximo de tres años (The Silver Institute, 2019, p. 11). La gráfica siguiente muestra los diferentes destinos de la plata en el 2018. Como se observa, el 56 % de la plata se destinó a la industria, el 26.5 % a la fabricación de joyería y platería, y el 17.5 % a la fabricación de barras y monedas.

Gráfica 6 Destinos de la demanda de la plata durante el 2018



Fuente: elaboración propia con datos de The Silver Institute (2019, p. 8).

A la vanguardia en el uso industrial de la plata se encuentra China seguido de Estados Unidos y Japón, quienes para el año 2018 consumieron el 27.2, 23.3 y el 17.5 % respectivamente de la plata destinada a este rubro (The Silver Institute, 2019, p. 52). En gran medida, la plata es utilizada para la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos como los contactos eléctricos y electrónicos, y los interruptores y los chips utilizados en los robots que participan en el proceso automotriz o en los propios automóviles (The Silver Institute, 2019, p. 54).

En el cuadro siguiente se presentan las principales empresas productoras de plata en el mundo, las cuales en conjunto produjeron el 50 % de este metal en el 2018. A la

vanguardia se encuentra Fresnillo plc, quien produjo casi el 7 % de la plata a nivel mundial. Una empresa que opera tres de las principales minas de plata en el mundo: el Saucito y Fresnillo ubicadas en Zacatecas y San Julián en Chihuahua (Peñoles, 2018, p. 4). A parte de Fresnillo plc, otras empresas que también produjeron más de 1000 toneladas de este metal fueron Glencore plc y KGHM Polska Miedz S.A. Group.

Cuadro 14 Principales empresas productoras de plata a nivel mundial

Orden		Empresa	Producción (toneladas)	
2017	2018		2017	2018
1	1	Fresnillo plc. ¹	1687	1922
2	2	Glencore plc. ²	1174	1085
3	3	KGHM Polska Miedz S.A. Group ^{3,4}	1136	1055
6	4	Cia. De Minas Buenaventura S.A.A. ⁵	822	816
5	5	Polymetal International plc.	834	787
7	6	Pan American Silver Corp. ²	777	771
4	7	Goldcorp Inc.	890	762
9	8	Hochschild Mining plc.	595	613
11	9	Hindustan Zinc Ltd. ⁶	526	610
13	10	Southern Copper Corp. ⁷	495	538
12	11	Corp. Nacional del Cobre de Chile	521	531
10	12	Volcan Cia. Minera S.A.A. ⁵	538	529
17	13	Industrias Peñoles S.A.B. de C.V. ⁸	379	459
19	14	South 32 Ltd.	375	457
14	15	Boliden A.B. ⁹	413	410
18	16	Coeur Mining, Inc. ²	376	403
15	17	Sumitomo Corp. ⁴	398	392
22	18	First Majestic	303	363
8	19	Teck	669	358
16	20	Hecla Mining Company	386	324

Fuente: The Silver Institute (2019, p. 95). Notas: 1) Incluye el 100 % de las minas Penmont y excluye Silver Stream; 2) Productor de plata como metal primario; 3) Reportó producción de plata metálica; 4) Estimado; 5) Incluye socios minoritarios; 6) Incluye el 100 % de Pallancata y Moris; 7) Integra el metal refinado; 8) Plata extraída; 9) Metal en concentrados; 10) Excluye 100 % Fresnillo plc.

En el cuadro siguiente se mencionan las principales minas de plata a nivel mundial. En México, el principal productor de plata, existen seis de estas grandes minas, tres operadas por Fresnillo plc, una por Fortuna Silver Mines Inc., una por Pan American Silver Corp., y otra por Coeur Mining. Es interesante observar que tres de esas seis minas: Saucito,

Fresnillo y la Colorada se ubican en Zacatecas, un estado que aportó el 8 % de la plata a nivel mundial en el 2018 (CAMIMEX, 2019a, p. 215; The Silver Institute, 2019, p. 79). Por su parte, en Perú, un país que también es vanguardista en la producción de plata, existen dos minas importantes Uchucchacua y Pallancata propiedad de Cía. de Minas Buenaventura S.A.A. y de Hochschild Mining plc, respectivamente.

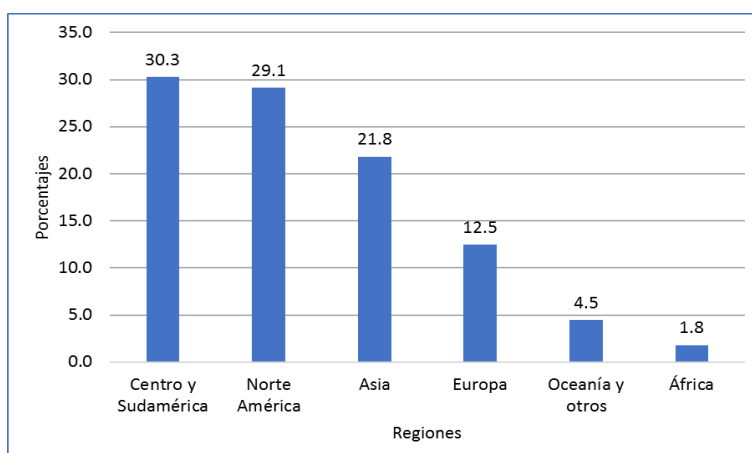
Cuadro 15 Principales minas de plata en el mundo y su producción 2017 – 2018
(toneladas)

Orden	Mina	País	Empresa	2017	2018
1	Saucito	México	Fresnillo plc.	660	618
2	Dukat	Rusia	Polymetal International plc. ¹	551	513
3	Uchucchacua	Perú	Cia. De Minas Buenaventura S.A.A.	516	480
4	Fresnillo	México	Fresnillo plc.	514	470
5	San Julián	México	Fresnillo plc.	328	455
6	Cannington	Australia	South 32 Ltd. ²	375	416
7	San José	México	Fortuna Silver Mines Inc.	234	248
8	Greens Greek	Estados Unidos	Hecla Mining Company	231	247
9	Imiter	Morocco	Managem	244	244
10	La Colorada	México	Pan American Silver Corp.	221	234
11	Palmarejo	México	Coeur Mining	225	234
12	Pallancata	Perú	Hochschild Mining plc.	185	218
13	San José	Argentina	Hochschild Mining plc. / McEwen Mining Inc.	201	190
14	Ying	China	Silvercorp Metals Inc	167	185
15	Rochester	Estados Unidos	Coeur Mining	147	157

Fuente: The Silver Institute (2019, p. 99). Notas: 1 Incluye Goltsovoye; 2 Reportó metal pagable en concentrado.

La gráfica siguiente muestra que la principal región productora de plata fue Centro y Sudamérica en el 2018, seguida por Norteamérica. Los principales países productores de estas regiones: México y Perú, produjeron el 40 % de la plata en el mundo (The Silver Institute, 2019, pp. 80–81).

Gráfica 7 Producción de plata por regiones mundiales durante el 2018



Fuente: The Silver Institute (2019, pp. 28–29).

La plata es un elemento presente en una concentración de 0.075 ppm en la corteza terrestre, y su abundancia (ubicada en el lugar 65) es 19 veces mayor que la del oro (Butterman & Hilliard, 2005, p. 7). Este metal puede proceder de minas donde es el principal producto de los minerales presentes, tal es el caso de la argentita (Ag_2S), o también puede ser un subproducto de minas cuyos minerales contienen una proporción mayor de oro, cobre, plomo o zinc. El cuadro siguiente muestra la producción mundial de plata por origen del metal en el 2018.

Cuadro 16 Producción de plata por origen del metal en el 2018

Fuente	Producción de plata (toneladas)	%
Como metal primario	6 967.0	26.2
Asociada al oro	3 238.0	12.2
Asociada al cobre	6 245.0	23.5
Asociada al plomo/zinc	10 042.0	37.7
Otro	124.0	0.5
Total	26 616.0	100.0

Fuente: The Silver Institute (2019, p. 99).

El plomo y el zinc, al igual que el oro y la plata son producidos en su mayoría por países en vías de desarrollo, de acuerdo a la clasificación establecida por UN. Durante el periodo 2013 – 2017, estos países suministraron más del 68 % de estos metales a nivel

mundial, siendo China el principal productor (BMNT, 2019, pp. 71 y 77). El cuadro siguiente muestra las fluctuaciones en el suministro y el uso de estos metales durante el periodo 2014 - 2018.

Cuadro 17 Suministro y uso del plomo y del zinc 2014 - 2019

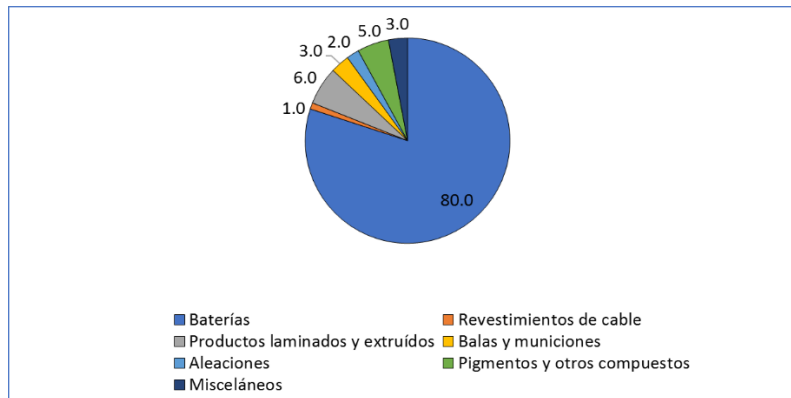
	Plomo (miles de toneladas)					Zinc (miles de toneladas)				
	2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015	2016	2017	2018
Producción minera	4 947	4 850	4 689	4 713	4 678	13 418	13 626	12 604	12 527	12 756
Producción del metal	11 026	10 959	11 169	11 589	11 642	13 398	13 812	13 579	13 222	13 176
Uso del metal	10 998	10 941	11 141	11 740	11 728	13 675	13 643	13 707	13 683	13 676

Fuente: International Lead and Zinc Study Group (2019).²²

Un análisis del cuadro anterior muestra que la cantidad de plomo utilizada a nivel mundial tiene una tendencia al alza a pesar de que la producción minera se ha mantenido relativamente constante durante los últimos cinco años, este hecho da a pensar que la producción de este metal a partir de materiales de desecho es una vía de suministro importante. De hecho, el plomo es uno de los metales con más altas tasas de reciclaje en el mundo, más que el vidrio o el papel periódico, o más que el aluminio, el cobre o el zinc. Las baterías de plomo son un ejemplo de los productos más reciclados en el mundo (ILA, 2015). En la gráfica siguiente se presentan los usos principales del plomo.

²² La producción minera se determina mediante el análisis químico de minerales destinados a la extracción de plomo y zinc, así como de concentrados con contenidos de estos metales. La producción del metal es la que procede de las fundiciones y refinerías, a partir de materiales primarios como los concentrados o materiales secundarios como materiales de desecho (ILZSG, 2019).

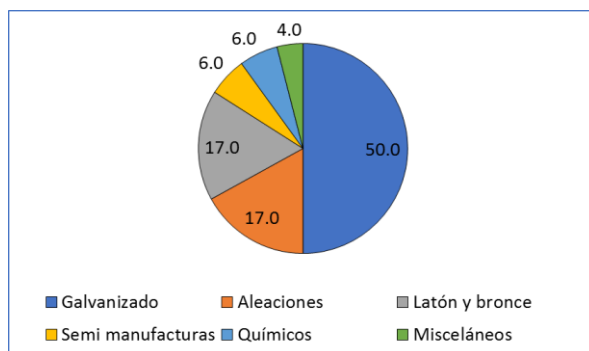
Gráfica 8 Usos principales del plomo



Fuente: traducción propia con datos de ILZSG (2019).

Por su parte, el zinc es el cuarto metal industrial más utilizado en el mundo después del hierro, del aluminio y del cobre. El zinc posee propiedades anticorrosivas, por lo que si se adhiere al hierro o al acero evita que estos materiales se oxiden. El principal uso del zinc es la galvanización, un proceso que adiciona capas delgadas de este metal a los materiales mencionados. El zinc también se alea con el cobre para formar el latón o con otros metales para formar diversos materiales utilizados en los automóviles, en los componentes eléctricos o en los accesorios domésticos. Otra actividad en la que participa este metal es en la síntesis del óxido de zinc, un polvo blanco utilizado en la fabricación de caucho y en productos farmacéuticos (Geology.com, 2019). La gráfica siguiente muestra los usos de este metal.

Gráfica 9 Usos principales del zinc



Fuente: ILZSG (2019).

A pesar de que China ha sido el primer productor de zinc, su suministro durante los últimos años no ha crecido como se esperaba, incluso cuando los precios de los concentrados de este metal alcanzaron precios récord. Esto se debe a que gobiernos como Mongolia han impuesto restricciones ambientales a una serie de industrias incluyendo a la minería del zinc. No obstante, algunos proyectos nuevos que aún no operan por cuestiones técnicas y legales prometen aumentar la producción de zinc en este país. Tal es el caso de la mina Huo Shao Yun ubicada en Xinjiang, la última mina de zinc más grande del mundo descubierta en China, cuya producción fluctuará entre 200 000 y 400 000 toneladas. Otro proyecto de interés es la mina Guojiagou, detenida también por cuestiones ambientales, que se espera inicie operaciones y produzca de 50 000 a 80 000 toneladas por año. Se tiene expectativa de que estos grandes proyectos suplan la demanda de las minas pequeñas que enfrentan problemas ambientales en este país (Goldman Sachs, 2018, p. 3).

Ante estos percances en China, se tiene la expectativa que la producción de zinc crezca favorablemente en otros países. En el cuadro siguiente se mencionan las minas en expansión y los nuevos proyectos aún no en producción que se espera fructifiquen.

Cuadro 18 Nuevos proyectos y minas en expansión proveedoras de zinc fuera de China y su producción 2017 – 2018 (miles de toneladas)

Orden	Mina	País	2017	2018
1	Mt Isa	Australia	226	320
2	Century	Australia	0	30
3	Gamsberg	Sudamérica	0	116
4	Dugald River	Australia	11	81
5	Zhaimem	Kazakhstan	0	0
6	Citronen	Grecia	0	0
7	Kipushi	DRC	0	0
8	Mehdiabad	Iran	0	0
9	Asmara	Eritrea	0	0
10	Khnaiguiyah	Arabia Saudita	0	0
11	Shalkiya	Kazakhstan	0	0
12	Antamina	Perú	372	390
13	Neves Corvo	Portugal	71	70
14	Zawar Mines	India	15	55
15	Tala Hamza	Algeria	0	0

Fuente: elaboración propia con datos de Goldman Sachs (2018).

La incertidumbre económica en la minería continúa aumentando a medida que las tensiones comerciales entre Estados Unidos y China se incrementan. La desaceleración económica ha influido en las expectativas de crecimiento de Europa y de países de rápido desarrollo. Aunque Estados Unidos y China han sido los países centrales en esta guerra comercial, en otras regiones del mundo, los aranceles y otras barreras comerciales están aumentando. Esta guerra y el hecho de que China ha tratado de orientar su economía hacia el consumidor, ha disminuido las expectativas de crecimiento del PIB chino y, con ello, la demanda de materias primas como los metales. El repunte de los precios de los metales y el aumento de las inversiones en exploración y explotación durante los años 2016 y 2017, parecen cambiar de rumbo (PDAC & Oreninc, 2019, p. 7).

En conclusión, a nivel mundial, la minería es una actividad que se ha disipado por todos los rincones del mundo. A pesar de que las políticas económicas han permitido una mayor deslocalización de las empresas mineras en el mundo, la mayor parte de los minerales sigue siendo suministrada por países en vías de desarrollo como China, México, Brasil, Perú, Chile, India y Sudáfrica. En especial las regiones de África y de Centro y Sudamérica suministraron casi el 40 % del oro en el 2018. Este metal sigue siendo una de

las mercancías más importantes dentro del sistema capitalista, su estabilidad química y el trabajo que se invierte en generar una onza de este metal, hacen de él, el equivalente general con más reconocimiento a nivel mundial. El oro en su mayoría es utilizado en la fabricación de joyas, a la inversión física y al respaldo de la moneda. No obstante, desempeña un papel importante en el desarrollo de las nuevas tecnologías relacionadas con Industria 4.0.

La concentración del capital es un aspecto que no se puede perder de vista en el análisis del presente apartado. Con respecto al oro, las veinte empresas más grandes produjeron más del 37 % de este metal en el 2018. Además, diecisiete de las treinta minas más grandes del mundo son controladas por cinco de las empresas mineras: Barrick Gold, Newmont Mining, AngloGold Ashanti, Kinross Gold y Polyus Gold. En el caso de la plata, las quince empresas más grandes produjeron el 50 % de este metal en el 2018. A la vanguardia se encuentra Fresnillo plc, una empresa que suministró el 7 % de la plata en este año.

3.2.1 Los metales en el contexto nacional

En el cuadro siguiente se presenta un resumen de la participación de México en la producción minera nacional y mundial en el 2018. Como se observa, a nivel mundial, México se ubicó dentro de los primeros nueve lugares de producción de oro, plata, zinc, plomo y cobre. A nivel nacional, el estado de Sonora ocupó el primer lugar en producción de oro y cobre, y Zacatecas el primer lugar en plata, zinc y plomo. El cuadro subsiguiente muestra las principales minas productoras de oro en México, donde se observa que la producción anual de las cuatro primeras se encuentra por arriba de las 220 000 onzas, equivalentes a 6.8 toneladas.²³

²³ Considerando que una onza troy equivale a 31.103 gramos y, por lo tanto, una tonelada es igual a 32 151.239 onzas troy.

Cuadro 19 Participación de México en la producción minera nacional y mundial 2018

Metal	Porcentaje de la producción mundial	Lugar en la lista	Producción 2018 (toneladas)	Principales estados productores	Porcentaje de la producción nacional
Oro	3.8	8	115.4	Sonora	34.0
				Chihuahua	18.5
				Guerrero	14.4
				Zacatecas	13.0
Plata	23.0	1	6 116	Zacatecas	37.0
				Chihuahua	21.4
				Durango	15.7
Zinc	5.0	6	690 895	Zacatecas	47.0
				Chihuahua	14.8
				Durango	13.9
Plomo	5.1	5	240 304	Zacatecas	55.5
				Chihuahua	16.6
				Durango	8.9
Cobre	3.6	9	751 005	Sonora	81.3
				Zacatecas	6.3

Fuente: Metals Focus (2019, p. 18), The Silver Institute (2019, p. 95) y CAMIMEX (2019b, pp. 36, 40, 44, 47 y 50).

Cuadro 20 Principales minas productoras de oro en México

Unidad	Empresa	Estado	Producción 2018 (miles de onzas)
La Herradura	Fresnillo plc	Sonora	474.2
Limón- Guajes	Torex Gold	Guerrero	353.9
Peñasquito	Goldcorp	Zacatecas	272.0
Pinos Altos – Crestón Mascota	Agnico Eagle	Chihuahua	221.2
Los Filos	Leagold Mines	Guerrero	195.4
Mulatos	Alamos Gold	Sonora	175.5
Noche Buena	Fresnillo plc	Sonora	167.2
Dolores	Pan American Silver	Chihuahua	136.6
Palmarejo	Coeur Mining	Chihuahua	122.7
La India	Agnico Eagle	Sonora	101.4
Total			2 220.1

Fuente. CAMIMEX (2019b, p. 37).

En el caso de la plata, Zacatecas y Chihuahua produjeron más de la mitad de este metal durante el 2018. La producción minera de plata en México se obtiene básicamente de tres orígenes: 49.0 % de minas donde este metal es el principal producto, 33.6 % como subproducto de minas donde los principales productos son el plomo y el zinc, y 13.3 % de

minas donde la plata se encuentra asociada con el oro (The Silver Institute, 2019, p. 99). En el cuadro siguiente se presentan las principales diez minas productoras de plata en México, donde se observa que las cuatro primeras producen más de 14 millones de onzas por año, equivalentes a más de 435 toneladas.

Cuadro 21 Principales minas productoras de plata en México

Unidad	Empresa	Estado	Producción 2018 (millones de onzas)
Saucito	Fresnillo plc	Zacatecas	19.8
Peñasquito	Goldcorp	Zacatecas	18.3
Fresnillo	Fresnillo plc	Zacatecas	15.1
San Julián	Fresnillo plc	Chihuahua	14.6
San José	Fortuna Silver	Oaxaca	8.0
La Colorada	Pan American Silver	Zacatecas	7.6
Palmarejo	Coeur Mining	Chihuahua	7.5
La Ciénega	Fresnillo plc	Durango	6.0
Tizapa	Industrias Peñoles	Estado de México	5.9
El Herrero	Minas de Bacis	Durango	4.6
Total			107.4

Fuente: CAMIMEX (2019b, p. 41).

En lo que se refiere a la producción de plomo y del zinc, Zacatecas, Chihuahua y Durango, obtuvieron más del 75 % de estos metales en el 2018. El cuadro siguiente muestra las principales minas productoras de estos metales, las empresas a las que pertenecen y su producción durante el 2018.

Cuadro 22 Principales minas productoras de plomo y zinc en México

Zinc				Plomo			
Mina	Empresa	Estado	Producción 2018 (miles de toneladas)	Mina	Empresa	Estado	Producción 2018 (miles de toneladas)
Peñasquito	Goldcorp	Zac.	144.33	Peñasquito	Goldcorp	Zac.	52.75
Velardeña	Industrias Peñoles	Dgo.	78.35	Saucito	Fresnillo plc	Zac.	22.66
Francisco I. Madero	Industrias Peñoles	Zac.	45.28	Fresnillo	Fresnillo plc	Zac.	19.62
Tizapa	Industrias Peñoles	Edo. De Méx.	40.96	Santa Bárbara	Minera México	Chih.	16.91
Fresnillo	Fresnillo plc	Zac.	31.09	La Colorada	Pan American Silver	Zac.	8.84
Saucito	Fresnillo plc	Zac.	29.51	Francisco I. Madero	Industrias Peñoles	Zac.	8.53
Zimapán	Carrizal Mining	Hgo.	27.99	Tizapa	Industrias Peñoles	Edo. De Méx.	8.25
San Julián	Fresnillo plc	Chih.	22.03	Zimapán	Carrizal Mining	Hgo.	8.00
Bismark	Industrias Peñoles	Chih.	20.94	El Águila	Gold Resources	Oax.	7.28
El Águila	Gold Resources	Oax	19.81	Sabinas	Industrias Peñoles	Zac.	6.68
Total			460.29	Total			159.52

Fuente: CAMIMEX (2019b, pp. 47 y 51).

Por último, en el caso del cobre, el estado de Sonora es el primer productor de este metal. El cuadro siguiente muestra las principales minas productoras de cobre, las empresas a las que pertenecen y su producción durante el 2018.

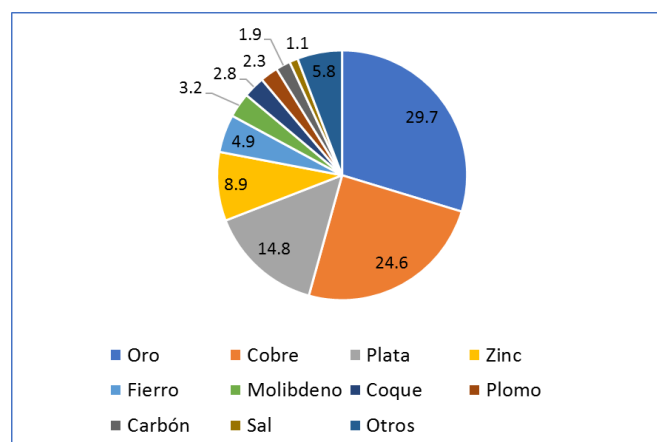
Cuadro 23 Principales minas productoras de cobre en México

Unidad	Empresa	Estado	Producción 2018 (miles de toneladas)
Buenavista del cobre	Minera México	Sonora	324.9
La Caridad	Minera México	Sonora	106.1
NEMISA	Neg. Mra. Sta. Ma. De la Paz	San Luis Potosí	25.1
Cozamin	Capstone Mining	Zacatecas	16.4
Zimapán	Carrizal Mining	Hidalgo	11.0
Piedras Verdes	Cobre del Mayo	Sonora	9.4
Bolívar	Sierra Metals	Chihuahua	7.8
Sabinas	Industrias Peñoles	Zacatecas	4.7
La Negra	Orion Mine Financing	Querétaro	3.9
Charcas	Minera México	San Luis Potosí	3.2
Total			512.5

Fuente: CAMIMEX (2019b, p. 45).

El PIB de la industria minero-metalúrgica representó el 8.2 % del sector industrial y el 2.4 % del PIB nacional para el 2018. Esta industria en conjunto aportó 241 634 millones de pesos, persistiendo el oro como el metal con mayor participación económica, seguido por la plata, el plomo y el zinc (CAMIMEX, 2019b, p. 18). En la gráfica siguiente se presenta un análisis de los metales y su valor en la producción minero metalúrgica nacional.

Gráfica 10 Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2018 (241 634 millones de pesos)



Fuente: CAMIMEX (2019b, p. 19).

En conclusión, México es un país con grandes reservas mineras que por varios años ha conservado el liderazgo en la producción de plata. Actualmente en este país existen seis de las quince minas productoras de plata más grandes del mundo, de las cuales tres son operadas por Fresnillo plc, una por Fortuna Silver Mines Inc., una por Pan American Silver Corp., y otra por Coeur Mining. También en México se ubica una de las minas más productivas de oro en el mundo operada por Fresnillo plc, tal es el caso de La Herradura, ubicada en el estado de Sonora.

En particular tres de las minas más grandes de plata en el mundo se ubican en el estado de Zacatecas: Saucito, Fresnillo y la Colorada. Un estado que aportó el 8 % de la plata a nivel mundial en el 2018 y que, además, es el primer productor de plata, plomo y zinc a nivel nacional. Las empresas mineras líderes mundiales en la producción de oro y plata se encuentran representadas en este estado: Newmont Goldcorp y Fresnillo plc. Asimismo, de las diez minas más productivas de plomo y zinc a nivel nacional, seis se ubican en Zacatecas.

CAPÍTULO 4 DESARROLLO TECNOLÓGICO Y LA MINERÍA DE MÉXICO

El capítulo siguiente se divide en dos apartados. En el primero se identifican los principales elementos tecnológicos que incrementaron la producción minera en distintas épocas de la historia de México. El segundo apartado se describen las nuevas tecnologías que la minería ha adoptado durante las últimas décadas, y se analizan sus impactos en el proceso, el medio socioeconómico y el ambiente.^{24 25}

Por tratarse de una actividad que utiliza los espacios naturales como objeto de trabajo, normalmente se piensa que su desarrollo tecnológico es menor que en otras ramas industriales donde el espacio de producción es totalmente artificial. Sin embargo, el avance en las tecnologías de la información y su integración con las tecnologías operativas ha transformado a la minería al igual que otras ramas industriales.

4.1 Evolución de la tecnología en la minería

La evolución tecnológica de la minería en México ha tenido cuatro momentos importantes. Si se omite el gran periodo pre-colonial donde los metales eran utilizados básicamente con fines suntuarios, la Colonia (1521-1821) se sitúa como el primer momento donde se explotó el oro y la plata para su conversión en dinero.²⁶ El segundo momento se sitúa en el porfiriato (1876-1911) y hasta las primeras décadas del siglo XX. El tercer momento tiene lugar al final de los años cuarenta, y el cuarto momento se ubica desde los años ochenta del siglo XX.²⁷ En los párrafos siguientes se presenta una breve semblanza de cada uno de estos momentos.

²⁴ El apartado 4.1 es una versión modificada y resumida del artículo: Una revisión histórica de la automatización de la minería en México (Robles & Foladori, 2019), publicado en la revista Problemas del Desarrollo.

²⁵ El apartado 4.2 es una versión modificada del artículo: Industria 4.0 en la minería mexicana (Robles et al., 2020), publicado en la revista El Colegio de San Luis.

²⁶ En la historia económica la tecnología siempre ha tenido un papel relevante. Marx, por ejemplo, señalaba: “lo que diferencia unas épocas de otras no es lo que se hace, sino cómo, con qué medios de trabajo se hace” ([1867] 1975a, p. 218). Marx refiere esta distinción a etapas económicas radicalmente diferentes, como modos de producción; sin embargo, la idea de la importancia de los cambios tecnológicos puede ser utilizada (con las reservas necesarias) para distinguir periodos, aún dentro del mismo modo de producción.

²⁷ Los momentos más importantes de desarrollo de la tecnología en México en el siglo XX, corresponden a los señalados por Sariego *et al.* en la introducción de su obra *El Estado y la Minería Mexicana* (1988).

La expropiación que deslinda al trabajador de la tierra constituye un factor clave en el inicio de la llamada acumulación original del capital, un proceso con diversas tonalidades en los distintos países. En América, el descubrimiento de las minas de oro y plata, el exterminio y la esclavitud de los pobladores indígenas, así como, la conquista y el saqueo de los recursos naturales propiciaron la acumulación original del capital europeo (Marx [1867], 1988, p. 939). Para finales del siglo XV y principios del siglo XVI, se creó un sistema mundial centrado en Europa y supeditado al comercio, que se fortaleció por cuestiones culturales, acuerdos políticos y estructuras confederales (Wallerstein, 2011, p. 21).²⁸

La expansión de las demandas económicas europeas hacia regiones americanas, implicó la transformación de las relaciones sociales de producción y la introducción de nueva tecnología importada de Europa. La explotación de metales preciosos y otros insumos coadyuvó a la formación de la economía mercantil europea de los siglos XVI, XVII y XVIII. Posteriormente, el surgimiento de la gran industria a finales del siglo XVIII y su expansión en el siglo XIX encadenó a América Latina en la división internacional del trabajo, una relación de dependencia que determinó el curso social y económico de la región en los siglos posteriores (Marini, 1991).²⁹

En el primer momento, el sistema productivo minero de la Colonia estaba basado casi exclusivamente en la extracción, beneficio y comercio de los metales preciosos, en especial de la plata. Dentro de las primeras minas que se descubrieron se encontraban las de Compostela en la Nueva Galicia (1543), la del Cerro de la Bufa en Zacatecas (1546), la de Sultepec y Temascaltepec (1548), la Valenciana en Guanajuato (1548), las de Sombrerete en Zacatecas (1551), y las de Fresnillo en Zacatecas (1553) (Semo, 1980, p. 38). En este

²⁸ Aunque durante las últimas tres cuartas partes del siglo XX y lo que va del XXI los metales preciosos no son utilizados mayoritariamente como dinero, sino que se destinan principalmente a usos suntuarios, el peso que continúa teniendo el oro como reserva de valor sigue siendo clave, como lo demuestra la corrida hacia el oro como refugio de valor cuando ocurren crisis financieras, lo cual muestra que el papel del oro como dinero en su función de reserva de valor es un indicador más importante que el destino proporcional de su producción. En la actualidad aproximadamente un 30% de la producción de oro es para reserva de valor en lingotes y monedas (Coulson, 2011; Geocomunes, 2017).

²⁹ Rosenberg argumenta, interpretando a Marx, que una nueva fuerza productiva no surge espontáneamente, como si fuese una cuestión misteriosa, sino más bien como una salida dialéctica a un proceso histórico donde las fuerzas productivas y las relaciones de producción son actores esenciales (Rosenberg, 1976, p. 60).

sistema colonial se explotaban los filones de mineral en excavaciones abiertas para luego ahondar a mayor profundidad, esto llevó a construir túneles retorcidos y estrechos con muchos problemas operacionales –“sistema de rata”, como se le conocía en la Nueva España (Bakewell, 1990, p. 54). La primera mejora técnica que se desarrolló en la minería mexicana fue la construcción de socavones y túneles inclinados para conectar las galerías inferiores y facilitar la ventilación, el drenaje y la extracción de mineral. En 1556 se construyó el primer socavón para dar servicio a varias minas en la montaña del Potosí (Bakewell, 1990, p. 55).

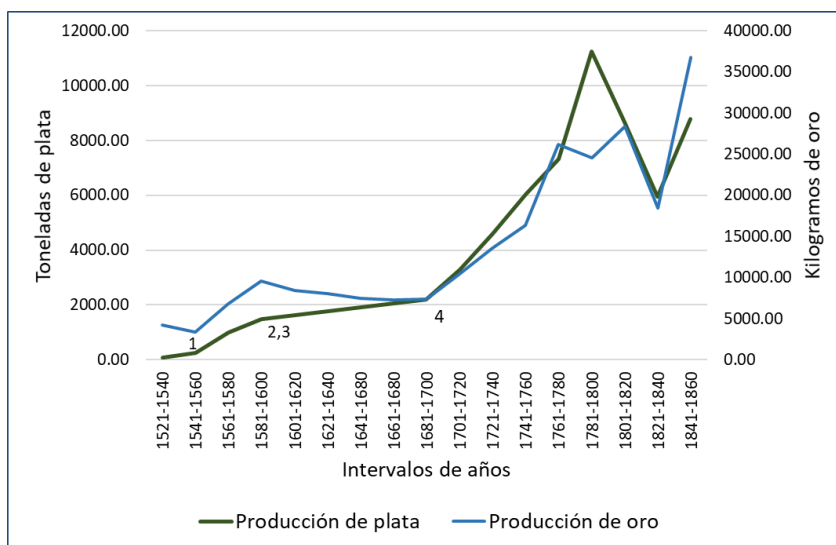
Durante el transcurso del siglo XVIII, al hacerse más profundos los tiros, se utilizaron malacates para subir el mineral a través de los tiros –mecanismos simples de una polea tirada por animales– (Brading, 1975, p. 185). Las técnicas de procesamiento de mineral iniciaron su evolución durante el dominio español, la fundición fue el primer avance tecnológico desarrollado en esta rama, mediante este procedimiento se refinaban pequeñas cantidades de mineral con altas concentraciones de plata (Ramos Ramírez, 2014, p. 37). El horno utilizado denominado “castellano” se componía de un tiro vertical con orificios para introducir el mineral, y extraer el metal y la escoria. Este horno se podía acompañar de otro llamado reverbero para realizar las operaciones de copelación y refinación de plata. La primera planta de fundición descrita en los archivos de Zacatecas data del año 1608 (Bakewell, 1976, p. 202).

Otra técnica de procesamiento de metales que se expandió con gran rapidez fue el beneficio con azogue o mercurio. Alrededor del año 1600, en la Nueva España había alrededor de 370 haciendas que extraían plata mediante esta técnica (Bakewell, 1990, p. 56). Aún se discute el origen de dicho proceso, algunos autores sostienen que data de Alemania; y aunque los principios de la amalgama se conocen desde la antigüedad, se cree que este proceso fue utilizado por primera vez a nivel industrial en México, gracias a los trabajos de Bartolomé de Medina (Semo, 1980, p. 43). Esta técnica acompañada de la trituración con molinos de propulsión hidráulicos o con animales permitió aprovechar una amplia gama de minerales (Bakewell, 1976, p. 194). La explotación y comercio del azogue fue monopolio de la Corona Real de España, este elemento se extraía de las minas de

Almadén en España, o se adquiría por compra en las minas de Indra, Australia (Othón de Mendizábal, 1980, p. 73). Aún es posible encontrar vestigios de contaminación por mercurio en México, tal es el caso de la laguna La Zacatecana ubicada en el municipio de Guadalupe, Zacatecas.

La producción minera durante la Colonia fue reducida debido al escaso desarrollo de las fuerzas productivas. México exportó a Europa 56 144 kg de plata en un poco más de tres siglos (1521 – 1830). Una cantidad que en la actualidad es obtenida en menos de dos décadas (González Rodríguez, 2011, pp. 5–6). Pese a las diferencias relativas en el tiempo, el periodo colonial por sí mismo incorporó nuevas tecnologías que incrementaron la productividad del trabajo. En la gráfica siguiente se puede apreciar como la producción de plata se eleva cada vez que se introduce una nueva tecnología.

Gráfica 11 Producción de oro y plata durante la época colonial 1521-1821



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2010), Bakewell (1976, 1990), Brading (1975). Desarrollo de tecnología: 1) construcción de socavones (1556), 2) técnica de fundición (años 1600), 3) beneficio de metales con azogue (años 1600), y 4) pólvora negra (años 1700).

El segundo momento importante en la evolución tecnológica de la minería en México, comenzó en el porfiriato y continuó hasta tres o cuatro décadas del siglo XX (Sariego et al., 1988, p. 11). El triunfo de la Reforma y el despojo de los bienes

pertenecientes al clero consolidaron una nueva aristocracia laica pero poco emprendedora. La llamada hacienda porfiriana no representó un avance significativo sobre el modelo colonial, no capitalizó otros procesos y, sólo explotó minerales preciosos de vetas ricas y poco profundas (Rosenzweig, 1988, p. 169). No obstante, las inversiones de capital internacional sobre todo estadounidense se hicieron presentes e impulsaron grandes avances tecnológicos en esta rama (Rosenzweig, 1988, p. 174).

La primeras dos revoluciones industriales (vapor y electricidad) se consolidaron en este momento, fue el inicio de la producción de metales industriales como los no ferrosos y los siderúrgicos (plomo, cobre, zinc, hierro y carbón) (Sariego et al., 1988, p. 11). La explotación del carbón a nivel industrial permitió un avance sustancial en la fundición de cobre y en la expansión de los ferrocarriles (Corona Esquivel et al., 2006, p. 141). Este último suceso facilitó el acceso a las minas y disminuyó los costos de acarreo de minerales. Más del 16 % de los caminos férreos eran considerados exclusivos de la actividad minera para 1908 (Sariego et al., 1988, p. 35).

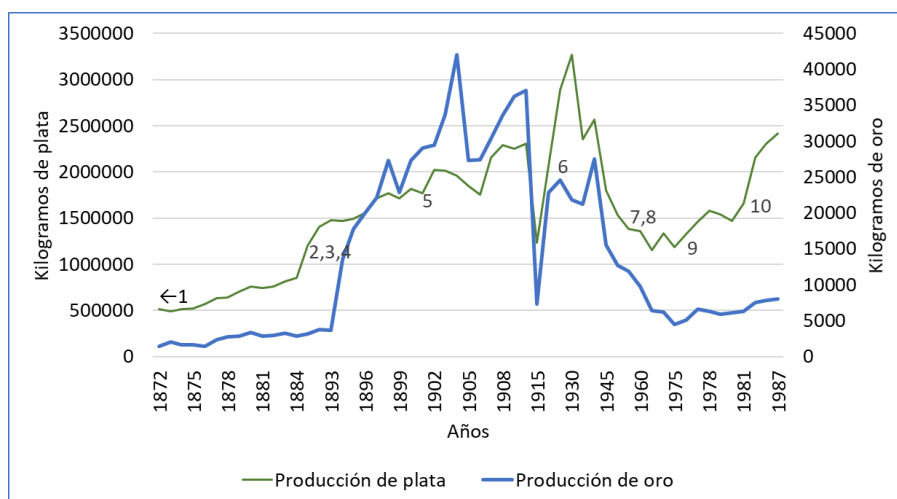
En este periodo destaca la construcción de varias fundiciones y las primeras obras eléctricas de gran escala. Las primeras plantas fundidoras fueron construidas en Monterrey y Aguascalientes en 1891 y 1894 respectivamente. Luego se construyó la de Velardeña en Durango y la de Avalos en Chihuahua. En conjunto estas instalaciones procesaban el 40 % del plomo y el 20 % de la plata producida en México y, además, se enfrentaban a la competencia estadounidense. A tal grado que los propietarios (la familia Guggenheim) lograron asociarse ventajosamente con ASARCO, una empresa originaria de ese país (Sariego et al., 1988, p. 36). Por su parte, las grandes minas iniciaron su electrificación después de 1900 a un ritmo tan intenso que en una década todas se encontraban electrificadas (Bernstein, 1964, pp. 41–44).

En la explotación se utilizaron productos más energéticos que la pólvora negra entre 1867 y 1950, denominados “dinamitas gelatinosas”, los cuales minimizaron las fallas en las detonaciones (Konya & Walter, 1991). También en este segundo momento a principios del siglo XX, comenzó la utilización de cianuro para procesar minerales y extraer metales preciosos. Una de las primeras plantas más atractivas del momento equipada con filtración

continúa al vacío y tanques con agitación se situó en Pachuca, Hidalgo (Marsden & Lain, 2006, p. 8). Del mismo modo, los sulfuros de cobre, plomo y zinc comenzaron a ser tratados por la flotación selectiva (Marsden & Lain, 2006, p. 9).

La gráfica siguiente muestra el comportamiento de la producción minera de oro y plata en el porfiriato y el periodo de ISI. En el caso de la plata, su producción se incrementó después de la instalación de las primeras fundiciones y del comienzo del uso del cianuro, excepto en la coyuntura de 1905 cuando una reforma monetaria colocó a México fuera del patrón monetario de la plata (Sariego et al., 1988, p. 43). En el caso del oro la tendencia fue similar, sin embargo, su escala de producción fue menor que la de la plata.³⁰

Gráfica 12 Producción de oro y plata en el porfiriato (segundo periodo) y en el periodo ISI (tercer periodo)



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2010), Sariego et al, (1988), Bernstein (1964), Konya & Walter (1991) y Ramírez & Alejano (2004). Desarrollo de tecnología: 1) dinamitas gelatinosas (1867), 2) electrificación (1889), 3) fundiciones (1891), 4) cianuración (1891), 5) mecanización simple (primeras décadas de los años 1900), 6) flotación (1920), 7) mecanización intensiva - maquinaria electromecánica y diésel (década de los años 1950), 8)

³⁰ A finales del siglo XIX cuando la equivalencia entre el oro y la plata comenzó a fluctuar debido a la depreciación constante de la plata, el valor del peso mexicano se tornó muy inestable, por lo que el gobierno mexicano decidió iniciar el cambio al patrón oro.

nitrate de amonio (mediados de la década de los años 1950), 9) mecánica de rocas (década de los años 1970), 10) automatización (década de los años 1980).

El tercer momento importante en la evolución tecnológica de la minería en México inició en la segunda posguerra con la explotación de minerales no metálicos, como el azufre, la fluorita y la barita (Sariego et al., 1988, p. 11). En este periodo se consolidó el sindicalismo minero y la intervención del Estado en esta actividad. El programa de mexicanización de la minería intentó aumentar la producción minera y orientarla hacia la industria y el mercado nacional, aunque no tuvo progresos significativos, excepto en la producción de carbón, cobre y hierro. La producción de plata, plomo y zinc se mantuvo estancada (Delgado Wise & Del Pozo Mendoza, 2001, p. 111).

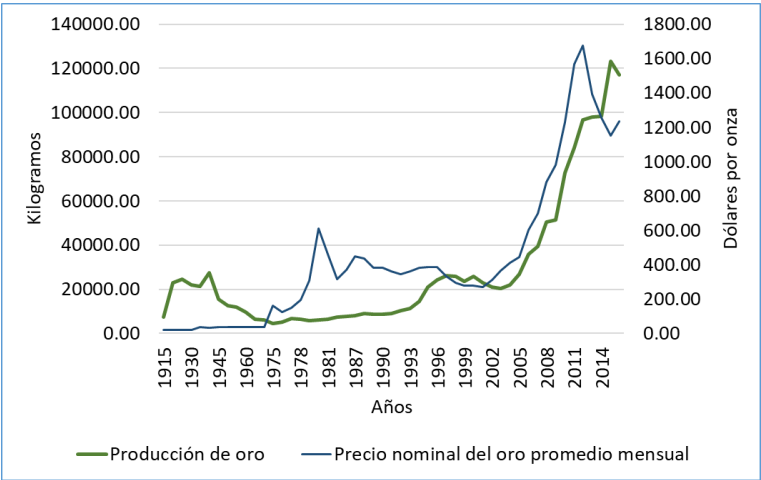
Desde los años cincuenta se introdujo maquinaria electromecánica y diésel de gran capacidad para explotar reservas de bajas concentraciones de metales conocidas como de baja ley (Sariego et al., 1988, p. 11). La explotación también se vio beneficiada con el desarrollo de un nuevo explosivo que revolucionó las detonaciones y acaparo rápidamente el mercado. Un producto formulado a base de nitrato de amonio y diésel más económico que la dinamita, denominado comúnmente ANFO (por las siglas en inglés de sus componentes) (Konya & Walter, 1991). Este periodo marcó el inicio de la sustitución progresiva del trabajo manual y la mecanización simple por la mecanización intensiva y la desprofesionalización del trabajo obrero (Sariego et al., 1988, p. 320).

Paralelamente a estos cambios, una gran cantidad de profesiones directamente relacionadas con la minería se crearon con fondos públicos y privados, se amplió la oferta existente que venía generándose desde que se inauguró el Real Seminario de Minería (1792). La primera casa de ciencias en México antecedente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México que inició la instrucción formal de la ingeniería minera en América (Escamilla & Pineda, s/f). En esta misma lógica se desarrollaron diversas ciencias en torno a la minería como la mecánica de rocas que permitió entender el comportamiento de los lechos rocosos y, con ello, se pudo mejorar la planeación de las operaciones mineras. Esta ciencia nació al final de la Segunda Guerra Mundial pero se desarrolló con mayor intensidad a partir de la década de los años setenta (P. Ramírez & Alejano, 2004, p. 11).

Durante los años setenta inició la tercera revolución industrial. Un evento liderado por la aplicación de la electrónica y las tecnologías de la información que ha automatizado diversos procesos industriales incluyendo a la minería. La automatización de las operaciones mineras contribuye a disminuir significativamente los peligros al personal, como la proximidad a poderosas máquinas, la exposición a fuerzas hidráulicas y eléctricas, las caídas de roca, y la exposición a polvos y gases provenientes de los explosivos. La automatización es un evento que hasta la fecha continua en desarrollo (Ralston et al., 2014).

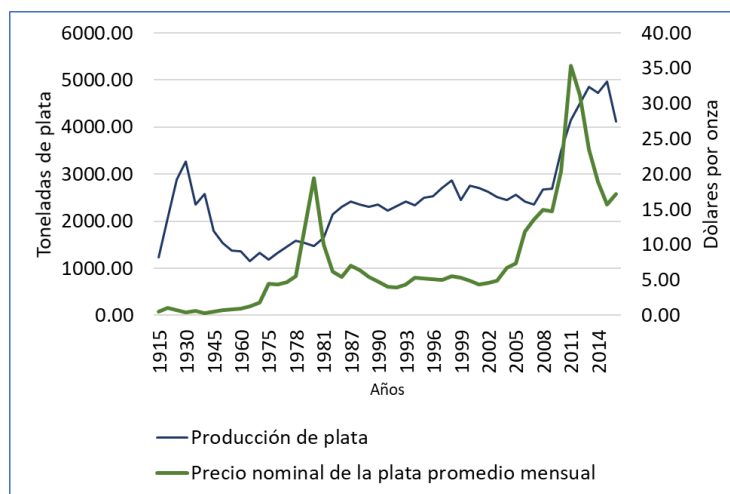
El cuarto momento comenzó desde los años ochenta con la apertura de la economía a las grandes empresas transnacionales. Las políticas gubernamentales han permitido a las grandes empresas mineras controlar amplias superficies de suelo. Sin embargo, el aumento de la producción desde inicios del presente siglo, es una de las características más notorias del desarrollo de la minería en México. Un acontecimiento dispuesto no sólo por el aumento de la demanda de los metales, a juzgar, los nuevos desarrollos tecnológicos han transformado todas las operaciones mineras. En las gráficas siguientes se presenta la producción de oro y plata durante el periodo 1915 - 2016, versus precio nominal.

Gráfica 13 Producción de oro en kilogramos años 1915 - 2016, versus precio nominal promedio mensual por onza en dólares



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2010), CAMIMEX (2017a) y Macro Trends (2018).

Gráfica 14 Producción de plata en toneladas años 1915 - 2016, versus precio nominal promedio mensual por onza en dólares



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2010), CAMIMEX (2017a) y Macro Trends (2018).

La década de los ochenta ha sido considerada como la más productiva en lo que a desarrollo de tecnologías de extracción de oro se refiere. Los procesos más aceptados por la minería han sido los sistemas de recuperación con carbón activado, lixiviación de minerales con bajas concentraciones de metales, electrodeposición y replantación, oxidación a presión de sulfuros, oxidación biológica de concentrados y cianuración intensiva (Marsden & Lain, 2006, p. 11). El desarrollo tecnológico de los próximos años en la metalurgia considerará la búsqueda de reactivos alternativos al cianuro en la lixiviación de oro, el mejoramiento de los tratamientos de sulfuros, el reemplazo de los sistemas de recuperación de carbón activado por resinas, la recuperación de oro de residuos electrónicos, la recuperación de los reactivos de los efluentes, entre otros aspectos (Marsden & Lain, 2006, p. 16).

Asimismo, en este periodo inició la gestación de la cuarta revolución industrial más conocida como Industria 4.0 desde la feria de Hannover, Alemania (2011) (Vogel-Heuser & Hess, 2016, p. 411). Una revolución estudiada con más detalle en el siguiente apartado. La cara más visible de los nuevos desarrollos tecnológicos en la minería son las explotaciones a cielo abierto. Aunque este tipo de explotación ha existido desde mediados del siglo XX, su

situación actual no es la misma. A su gran tamaño se le ha sumado la sincronización y automatización de todas las etapas productivas, a diferencia de las explotaciones anteriores donde mantenían cierta independencia. Estos cambios cualitativos y cuantitativos del proceso minero son el resultado de la aplicación de las nuevas tecnologías procedentes de la tercera y la cuarta revolución industrial.

En conclusión, una de las características más notorias del desarrollo de la minería es el quiebre productivo entre el siglo pasado y el presente, lo que muchos analistas han llamado el bum de la megaminería. La revisión de la evolución de la tecnología minera en México, permite proponer que los nuevos cambios tecnológicos son igual de importantes que las políticas gubernamentales y la demanda de los metales en el desarrollo de este quiebre productivo.

4.2 Nuevos avances tecnológicos en la minería

El siguiente apartado presenta los avances en Industria 4.0 de la minería de México, y las principales tendencias que se infieren de este desarrollo. Esta investigación es importante porque no existen investigaciones de este tipo, y porque se trata de una nueva revolución tecnológica que se está expandiendo a todas las ramas industriales incluyendo a la minería.

La minería ha tenido importantes avances tecnológicos en las últimas décadas. Lo trascendente no es el avance tecnológico en sí, sino el hecho de que las tecnologías de la cuarta revolución industrial están dirigidas a sincronizar y controlar de manera autónoma todas las etapas de un proceso productivo. El avance de las micro y nano tecnologías ha hecho esto posible, a diferencia del siglo pasado donde sólo etapas parciales del proceso eran automatizadas de manera independiente.

Las tres revoluciones industriales por las que ha transitado el ser humano (vapor, electricidad, electrónica y tecnologías de la información), y una cuarta aún en desarrollo (Industria 4.0), han trascendido a todos los sectores industriales, incluyendo a la minería. En México, los avances tecnológicos de la primera revolución industrial se consolidaron a principios del porfiriato (1876 – 1911), más de un siglo después de su inició en el Reino de Gran Bretaña (1760-1840). Una referencia importante de este acontecimiento ocurrió en

1884, cuando por primera vez el carbón se explotó a nivel comercial en el estado de Coahuila. En un primer momento, este material se utilizó para fundir cobre en las minas de Pánuco, Coahuila, posteriormente se usó como combustible de los motores utilizados en el arrastre de los ferrocarriles (Corona Esquivel et al., 2006, p. 141).

La segunda revolución industrial acaecida a mediados del siglo XIX y principios del siglo XX, se caracterizó por el uso industrial de la electricidad y los derivados del petróleo. Esta nueva revolución también inició su gestación durante el periodo del porfiriato, cuando se electrificaron las primeras minas (Sariego et al., 1988, p. 38). Posteriormente, durante los años cincuenta, se inició la introducción de maquinaria electromecánica y diésel y, con ello, la explotación de reservas minerales de baja ley y la sustitución progresiva del trabajo manual (Sariego et al., 1988, pp. 11 y 320).

A diferencia de las dos primeras revoluciones industriales, que sólo introdujeron algunos elementos tecnológicos como fue la máquina de vapor, la electricidad, los hidrocarburos o la producción en línea, las dos últimas revoluciones industriales han desarrollado múltiples elementos tecnológicos, que en conjunto han permitido digitalizar, controlar y automatizar los procesos.

La tercera revolución industrial iniciada en la década de los años setenta es liderada por la aplicación de la electrónica y las tecnologías de la información. Esta revolución trajo consigo una mayor automatización de la maquinaria y el equipo, así como, el inicio de la digitalización de los procesos industriales. Esta última actividad aún continúa avanzando, hay quienes comentan que será la fuerza motriz que dirigirá la transformación de los diversos sectores industriales durante la cuarta revolución industrial. La digitalización es definida como la convergencia del mundo real con el virtual (Kagermann, 2015, pp. 23 y 32). Este proceso tecnológico recrea virtualmente el ciclo de vida de un producto o servicio, desde su planificación hasta su comercialización. Particularmente el mundo virtual es un espacio donde se toman decisiones para luego llevarlas al mundo físico.

La cuarta revolución industrial más conocida como Industria 4.0, fue nombrada así por primera vez en 2011, en la feria de Hannover, Alemania (Vogel-Heuser & Hess, 2016, p.

411). En esta nueva era, los cambios en los sistemas productivos son impulsados por la conjunción de las tecnologías de la información con los elementos operativos de un proceso (Lasi et al., 2014, p. 241). Dentro de las tecnologías que han desencadenado estos nuevos cambios se encuentran: el Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés), los sistemas ciber-físicos (CPS por sus siglas en inglés), la computación en la nube, la inteligencia de datos “*big data*”, la comunicación máquina a máquina (M2M por sus siglas en inglés), la robótica, la identificación por radiofrecuencia (RFID por su siglas en inglés), entre otros (Almada-Lobo, 2016, p. 17). En el núcleo de Industria 4.0 se encuentran los sensores, dispositivos que, son cada vez más eficientes debido al desarrollo de los nanomateriales (Critchley, 2019).

La aplicación de las tecnologías Industria 4.0 a los procesos industriales facilitó que los sistemas de control y automatización evolucionaran y dejaran de ser considerados sólo como tecnología operacional (Boyes et al., 2018, p. 1). A finales de los noventa su arquitectura aislada se interconectó con redes corporativas e internet (European Union Agency for Network and Information Security, 2018). Actualmente, los sistemas de control y automatización proporcionan información en tiempo real de todo el proceso, lo que permite dirigirlo eficientemente y, con ello, incrementar su productividad. La inclusión de plataformas de control interactivas en estos sistemas ha sido un elemento muy importante para gestionar las diversas actividades productivas (Barraguer, 2016, p. 40). Un sistema de control y automatización en la minería se integra básicamente por tres capas, como se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 24 Elementos de un sistema de control y automatización inteligente para un proceso minero

Capas	Elementos	
Capa 3 de control	Plataforma de programación y control de las operaciones inteligentes	
Capa 2 de comunicación	Sistema ubicuo de adquisición de la información - Sistema de comunicación inalámbrica	Sistema de posicionamiento preciso y de navegación inteligente
Capa 1 de operación	Equipo inteligente: perforadoras de roca o jumbos, perforadoras DTH, resagadores, cargadores y camiones de carga	

Fuente: adaptado de J. Li & Zhan (2018b, p. 383).

La primera capa, llamada operativa, se compone de equipos mineros inteligentes, como: perforadoras de roca o jumbos, perforadoras DTH, resagadores, cargadores y camiones de carga. Se denominan equipos inteligentes porque han sido dotados con dispositivos electrónicos. La segunda capa, llamada de comunicación, se compone básicamente de un sistema ubicuo de adquisición de la información, un sistema de comunicación inalámbrica y un sistema de posicionamiento preciso y de navegación inteligente. Finalmente, la capa de control, se integra por una plataforma responsable de la programación y control inteligente de todo el proceso minero. Este es el núcleo de todo el sistema, todas las operaciones inteligentes del proceso minero se transmiten de esta plataforma a todos los equipos de la capa uno pasando por la capa dos (J. Li & Zhan, 2018b, pp. 382–383).

El desarrollo de una mina totalmente automatizada y controlada lleva consigo una serie de etapas, las cuales inician con la instalación de la infraestructura de telecomunicaciones en todos los espacios de las minas subterráneas y a cielo abierto, como el cableado estructurado, la fibra óptica, los cuartos de control, los enlaces inalámbricos, las redes wifi, los equipos de telefonía, los servidores, los dispositivos para la expansión de la señal de celular, los nodos de comunicación móvil, el circuito cerrado de televisión, el control de acceso, la detección y supresión de incendios, y la radio comunicación. El objetivo de la instalación de esta infraestructura es el ofrecimiento de servicios de telecomunicaciones, como radio comunicación digital, telefonía a través de internet, video, sistemas de RFID, señal de celular y conectividad inalámbrica wifi (Lasec, 2018).

Luego continúa la digitalización del proceso minero y la integración de todos los sistemas que lo conforman, es decir, la creación de copias virtuales en tiempo real de cada una de las actividades mineras, a través de la información proporcionada por sensores o dispositivos electrónicos ubicados en equipos, máquinas, vehículos, personas, etcétera. Dentro de los sistemas que se ha pretendido digitalizar e integrar se encuentran los sistemas de localización y rastreo, los sistemas de evacuación, los sistemas anticolidión, las geocercas, el monitoreo de energía, el monitoreo de gases, la telemetría de equipos, el video en movimiento, entre otros. La idea es gestionar la información de todos los sistemas del proceso minero en una sola base de datos centralizada, para luego tele operarlos y controlarlos, así como para planificar acciones futuras en la mina (Lasec, 2018).

El World Economic Forum ha identificado cuatro áreas que jugarán un rol muy importante en la transformación automática y digital del sector minero (2017a, p. 10). En el cuadro siguiente se mencionan dichas áreas y se describen sus alcances.

Cuadro 25 Áreas en desarrollo para la transformación digital en la minería

Área	Alcance
Automatización, robótica y desarrollo de hardware operacional	Sustitución de actividades manuales o desarrolladas con maquinaria controlada por los trabajadores
Habilitación digital de la fuerza de trabajo	Conexión digital de los trabajadores
Integración de empresas, plataformas y ecosistemas	Integración y conexión de procesos, sistemas de información y otros dispositivos o sistemas
Análisis de última generación y soporte de decisiones	Procesamiento de datos a través de algoritmos matemáticos, para apoyar la toma de decisiones en tiempo real y la planificación futura

Fuente: elaboración propia en base a World Economic Forum (2017a, p. 10).

Las grandes empresas mineras que operan en México se han enfocado a controlar y automatizar aisladamente algunas actividades y sistemas. Muy pocas empresas han comenzado a colocar infraestructura y servicios de telecomunicaciones en todos los espacios de la mina, para luego, automatizar, controlar y digitalizar todas las actividades, aunque esta es la tendencia. De hecho, los nuevos avances tecnológicos en la minería,

tratan de que el nuevo sistema centralizado de control que se instale reconozca las actividades mineras previamente automatizadas.

Si bien los nuevos avances tecnológicos en la minería se han enfocado en un primer momento en elevar los índices de productividad de los procesos, también han traído consigo una serie de beneficios, como mejores condiciones de seguridad laboral, mayor protección de los equipos, ahorro energético, reducción de emisiones al ambiente, y reducción de los tiempos muertos. Aunque la producción de oro en México se ha incrementado significativamente a partir del presente siglo, aún no ha sido posible medir el impacto real de los sistemas de control y automatización, introducidos por empresas como Epiroc, Atlas CopCo, Caterpillar, Sandvik, Komatsu y Lasec. En gran medida esto se debe al constante aumento de los proyectos mineros en etapa de producción, que pasaron de 71 a 107 entre 2010 y 2017 (SGM, 2011, p. 21, 2018, p. 20).

En las diferentes actividades mineras a nivel mundial, se han identificado cinco niveles de automatización. En el primer nivel denominado “control manual local”, el operador visualiza constantemente el proceso y lo controla parcialmente a través de un cable que directamente se conecta con la interface de alguna máquina. El segundo nivel llamado “control manual remoto” es parecido al primero sólo que el operador controla las máquinas a través de una consola portátil. En el tercer nivel denominado “tele operación”, el operador continúa visualizando el proceso, pero ahora lo controla a través de sensores que le informan de la situación actual del proceso. En el cuarto nivel nombrado “tele supervisión”, el operador supervisa a distancia la ejecución de todo el proceso a través de monitores, utilizando tecnología de asistencia automatizada. Finalmente, en el quinto nivel llamado “automatización total”, el funcionamiento de la mayoría de los componentes del proceso es autónomo (Ralston et al., 2014, p. 306).

De acuerdo con esta clasificación, en México se cuenta ya con maquinaria y equipos pertenecientes a las grandes empresas que se ubican en el tercer, cuarto y hasta el quinto nivel de automatización. El último nivel se observa en las perforadoras rotativas de Epiroc ubicadas en la mina de Peñasquito (Epiroc, 2018). Los procesos mineros de las pequeñas y medianas empresas mineras continúan siendo de tipo manual, difícilmente acceden al

primer nivel de automatización. El cuadro siguiente muestra algunos ejemplos de sistemas de control y automatización de venta en el mercado.

Cuadro 26 Ejemplos de tecnologías de control y automatización de venta en el mercado

Etapa	Equipo	Marca	Origen
Extracción de mineral	Rig Control Systems (RCS), un sistema de control para perforadoras	Epiroc	Suecia
	Sistema autónomo de transporte AHS, un sistema autónomo de carga y transporte de mineral	Komatsu	Japón
Operación Mina	Certiq, plataforma de supervisión de equipos, un sistema que brinda informes del rendimiento de los equipos en tiempo real para un mantenimiento proactivo	Epiroc	Suecia
	Plataforma Mobilaris, un sistema que muestra información 3D en tiempo real de los procesos mineros subterráneos	Epiroc	Suecia
	Komtrax™, un sistema de monitoreo para equipos y flota a la vanguardia en tecnología inalámbrica	Komatsu	Japón
	Sistema Cat® MineStar™, un sistema que administra el rastreo de materiales, el estado de las máquinas, los equipos autónomos, entre otros elementos	Caterpillar	Estados Unidos
	Newtrax Technologies Inc, sistema de seguimiento de personal y vehículos y soluciones de telemetría de equipos móviles	Newtrax	Canadá
Trituración y molienda	Sistema de control de ajustes automáticos ASRi™ para trituradoras, el cual monitorea la carga y el tamaño del material alimentado, para luego, optimizar el equipo	Sandvik	Suecia
Flotación y lixiviación	ECS/ProcessExpert, un sistema de control para los sistemas de flotación y lixiviación que manipula los actuadores que controlan los niveles de pulpa, los flujos de pulpa, las tasas de aireación y la adición de reactivos	FLSmidth's	Dinamarca – Estados Unidos
	QCX/RoboLabs, sistema de análisis de muestras de laboratorio con equipos completamente automatizados	FLSmidth's	Dinamarca – Estados Unidos

Fuente: elaboración propia con base a Mining & Construction (2014), Komatsu (2018), Epiroc (2016), Mining & Civil Engineering (2018), Komatsu (s/f), Caterpillar (2018), International Mining (2018), Sandvik (s/f), FLSmidth (2018b), FLSmidth (2018a, p. 4) y entrevistas a informantes calificados.

En la gran minería de México se han automatizado los malacates, el sistema de bombeo primario, el sistema de ventilación primario, la trituración y la molienda, el sistema de transporte por bandas y los circuitos de flotación. Los equipos de barrenación, rezagado,

carga y transporte lo han hecho principalmente en las grandes minas a cielo abierto. Una mina a cielo abierto es más susceptible de ser automatizada que una mina subterránea, debido a que esta última posee condiciones menos favorables para la operación del equipo como temperaturas y concentraciones de polvo y humedad relativamente altas.

Figura 4 Fotografía de un sistema de control de una planta de flotación selectiva de cobre y zinc



Fuente: propia, fotografía tomada en la Compañía Minera Sabinas ubicada en Sombrerete, Zacatecas, el 3 de mayo de 2019.

Cuando una máquina se automatiza, se acompaña de un sistema de control capaz de dirigir las tareas y de reducir las fallas. En el caso de la perforación de superficie, Epiroc introdujo el sistema *Rig Control Systems* (RCS) en el año de 1998, un sistema dirigido a controlar perforadoras que sustituye la experiencia humana y el control manual de palancas de mando e interruptores en las perforadoras (Mining & Construction, 2014).

Un sistema de control puede estar dirigido tanto a una máquina o un sistema, como a un grupo de máquinas o sistemas. Normalmente éste trabaja con una sola base de datos centralizada que adquiere continuamente información de los elementos que controla. Un ejemplo de este tipo lo tiene Caterpillar. Un sistema de control llamado Cat MineStar System que administra en tiempo real alrededor de 5 500 máquinas en nueve estados de México pertenecientes a la minería y otros sectores, las cuales están dotadas de miles de

sensores en comunicación constante con un servidor. El cual reporta a los técnicos de cada región el estatus de las distintas máquinas y la necesidad de programar una visita técnica (Caterpillar, 2019).

En un proceso de automatización los sensores son elementos que miden el nivel de desempeño y también de desgaste de un equipo o maquinaria, son elementos que alertan cuando es necesaria la sustitución de piezas (Greengard, 2015, p. 67). Los sensores pueden colocarse en las rocas, en la maquinaria y el equipo, en los sistemas de procesamiento de mineral, en los sistemas de exploración remotos, en los cursos de agua, en las atmósferas subterráneas, entre otros espacios. Un ejemplo de estos dispositivos se encuentra en los sistemas de supervisión de ventilación de la marca Trolex, los cuales han incorporado sensores de vibración, flujo, presión, nivel y temperatura para garantizar atmósferas óptimas en las minas subterráneas (Trolex, s/f, p. 6).

También es factible que los propios trabajadores porten sensores para conocer exactamente en qué lugar de la mina se encuentran y la actividad que están realizando, esto garantiza una rápida acción de rescate en caso de accidente, pero también es un medio útil para controlar la intensidad del trabajo. Fresnillo plc ha adoptado un sistema de la marca Newtrax Technologies Inc que gestiona no sólo sus operaciones productivas, sino también la seguridad de las minas subterráneas. Es un sistema que incluye diversos elementos como el seguimiento del personal y los vehículos durante la jornada laboral (International Mining, 2018).³¹

La empresa mexicana de telecomunicaciones Lasec con el apoyo del Programa de Estímulos a la Innovación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), ha diseñado un dispositivo portable por el trabajador llamado "Tag", que puede ser rastreado por un sistema de espectro disperso. A través de este dispositivo el usuario puede emitir una señal de alerta ante cualquier emergencia, o también puede reportarse como fuera de

³¹ "Smart baseball caps (known as SmartCaps) that monitor their brainwaves to measure fatigue. The technology has been rolled out primarily with truck drivers and machinery operators, who are at risk from fatigue-related injuries" (World Economic Forum, 2017a, p. 16).

peligro ante la señal del mismo. Toda esta información es detectada y visualizada en una pantalla que informará sobre el estado de los trabajadores (CONACYT, 2017).

El uso de softwares constituye un elemento de suma importancia en el procesamiento de datos generados en las distintas etapas del proceso minero. Distintos softwares ofrecen herramientas de vanguardia que permiten simular la realidad con interfaces amigables. Existen softwares para la prospección, la exploración, el cálculo de reservas de minerales, la estimación de la factibilidad económica, la planeación, el diseño de una mina, la simulación de procesos metalúrgicos y la operación. En el proceso de flotación selectiva, por ejemplo, se ha sustituido ventajosamente el trabajo del experto metalurgista por softwares que optimizan significativamente la dosificación del cianuro, cuyo uso puede reducir hasta el 40% del costo total del beneficiado (Vella, 2017).

Dentro de las empresas especializadas en el desarrollo de software aplicados a la minería y a la geología se encuentran: Maptek (2018), Datamine (2018), Leapfrog (s/f), y Dassault Systèmes (2018). Vulcan de Maptek es uno de los paquetes de software más utilizados en la minería que posee un sistema de planificación minera y modelado 3D, que puede ser aplicado desde la exploración hasta la rehabilitación de un sitio (Maptek, 2015). La tendencia de los nuevos softwares no es solamente procesar una gran cantidad de datos, que para los seres humanos podría significar “tiempo muerto”, sino también incorporar algoritmos inteligentes que generen aprendizaje. Una de las tendencias es generar *machine-learning* softwares que corrijan las acciones de los usuarios en función de lo que el sistema aprende; tendiendo a sustituir la calificación humana por la virtual con el consecuente potencial desempleo.

En conclusión, el avance en las tecnologías de la información y su integración con las tecnologías operativas ha transformado a la minería al igual que otros sectores industriales. Algunas de las grandes empresas mineras más reconocidas en México ya han automatizado algunas de sus actividades, ahora la tendencia es la colocación de infraestructura y servicios de telecomunicaciones en todos los espacios de una mina, para luego, digitalizar, integrar, automatizar y controlar todas las actividades mineras a través de un único sistema centralizado, incluyendo a los trabajadores, quienes pueden portar dispositivos RFID para

su localización. Los sistemas de control y automatización utilizados por la minería de México son producidos por empresas extranjeras, no obstante, se vislumbra el inicio del desarrollo de empresas mexicanas proveedoras de tecnología como es el caso de Lasec.

4.3 Implicaciones socioeconómicos y ambientales de Industria 4.0 en la minería

Los avances en automatización y digitalización de los procesos industriales se han enfocado en aumentar el índice de productividad. Sin embargo, bajo su desarrollo subyacen fuerzas económicas, sociales y políticas que levantan preocupaciones, al igual que ha sucedido con las otras revoluciones industriales en la historia del capitalismo. Las principales preocupaciones que la literatura destaca pueden agruparse en tres grandes ítems, los cuales se exponen por separado, pero en la realidad se encuentran conjugados: concentración y centralización del capital, implicaciones laborales e incidencias ambientales.

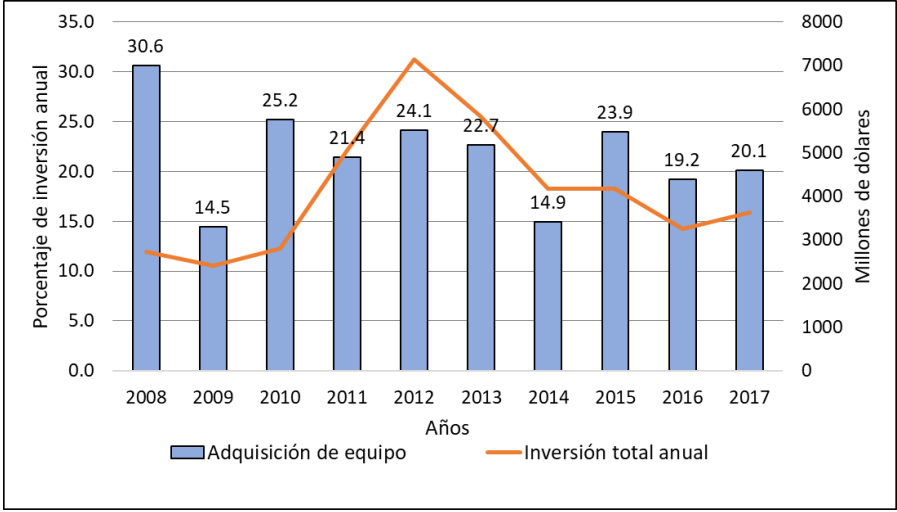
4.3.1 Concentración y centralización del capital

La organización automática y digital de todo el ciclo de vida de un proceso minero es una actividad propia de las empresas que pertenecen a grandes corporaciones. Son empresas que tienen el capital necesario para extraer grandes volúmenes de mineral, reinvertir en nuevas tecnologías y, con ello, aumentar su índice de productividad. Este es el caso de empresas como Minera Peñasquito del grupo Goldcorp que posee una capacidad instalada de procesamiento de mineral de 150 000 toneladas por día en la mina a cielo abierto ubicada en el municipio de Mazapil, Zacatecas (Minera Peñasquito, 2011, p. 6).

La minería no es la principal actividad productiva a la vanguardia de los procesos de automatización, pero si es una de las ramas que ha adoptado los nuevos avances tecnológicos. A pesar que las inversiones nacionales y extranjeras disminuyeron durante la segunda década del siglo XXI, la inversión en equipo siempre ha sido un rubro constante. La revisión de los informes anuales de la CAMIMEX muestra que el porcentaje promedio de inversión en la adquisición de equipo fue de casi 22 % durante el periodo 2008 - 2017. Un valor comparable con los porcentajes promedio de inversión en nuevos proyectos y expansión de proyectos con valores que fluctuaron en torno al 20 %. Las gráficas siguientes

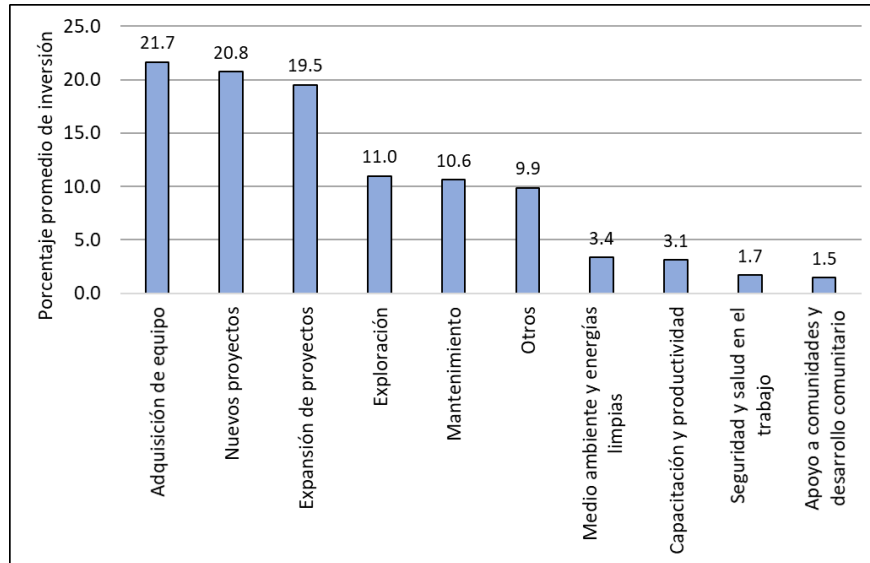
muestran los porcentajes de inversión en equipo y en otros rubros durante el periodo 2008 – 2017, en la última gráfica se observa que la inversión en medio ambiente y energías limpias, seguridad y salud en el trabajo, y apoyo a las comunidades y desarrollo comunitario, no sobrepasó el 7 % promedio durante el periodo 2008-2017.

Gráfica 15 Porcentajes anuales de inversión para la adquisición de equipo durante el periodo 2008 – 2017 por parte de las empresas afiliadas a CAMIMEX



Fuente: elaboración propia con datos de CAMIMEX (2009, p. 19, 2010, p. 20, 2011, p. 11, 2012, p. 7, 2013, p. 12, 2014, p. 17, 2015, p. 15, 2016, p. 20, 2017b, p. 25, 2018b, p. 32).

Gráfica 16 Porcentajes promedio de inversión en varios rubros durante el periodo 2008 – 2017 por parte de las empresas afiliadas a CAMIMEX



Fuente: elaboración propia con datos de CAMIMEX (2009, p. 19, 2010, p. 20, 2011, p. 11, 2012, p. 7, 2013, p. 12, 2014, p. 17, 2015, p. 15, 2016, p. 20, 2017b, p. 25, 2018b, p. 32).
 Nota. - dentro del rubro de otros se encuentra los gastos por seguridad patrimonial, investigación y desarrollo tecnológico y otros aspectos no especificados.

En México, poco menos del 100 % de la producción anual de minerales metálicos pertenece a las grandes empresas mineras. De acuerdo con el SGM el porcentaje anual de producción de oro en manos de la gran minería pasó del 42.2 al 98.96 % durante los años 2006 a 2016. En una década el 56.76 % de la producción de oro dejó de ser aportada por la pequeña y mediana minería. En el caso de la plata, el porcentaje anual de producción pasó del 83.7 al 96.52 % entre los mismos años, en una década el 12.82 % de la producción de plata dejó de ser aportada por la pequeña y mediana minería (SGM, 2007, p. 43, 2017, p. 28). Al parecer, desde el inicio del presente siglo, la producción anual de plata, a diferencia de la de oro, se encontraba más concentrada en la gran minería.

El cuadro siguiente muestra el porcentaje de producción de metales metálicos para el año 2017 por grupos de empresas. Como se puede observar, más de la mitad de la producción de metales metálicos se encuentra en manos de siete grandes empresas. En el

caso del cobre, sólo una empresa produce casi el 80 % de este metal. Si se considera que se pueden extraer diferentes metales en un mismo yacimiento, la concentración de capital por empresa es mucho mayor que las estadísticas por metal mencionadas en este cuadro.

Cuadro 27 Porcentaje de producción de metales metálicos durante el año 2017 por grupos de empresas

Metal	Porcentaje de producción	Empresas
Oro	50 %	Fresnillo plc, Goldcorp, Agnico Eagle y Minera Frisco
Plata	62 %	Fresnillo plc, Goldcorp, Industrias Peñoles, Grupo México y Pan American Silver
Cobre	77%	Grupo México
Zinc	80%	Industrias Peñoles, Goldcorp, Grupo México, Fresnillo plc y Minera Frisco
Plomo	57%	Goldcorp, Fresnillo plc e Industrias Peñoles

Fuente: elaboración propia con datos de CAMIMEX (2018a, pp. 251, 270, 281, 292 y 301).

Es previsible que las nuevas tecnologías conducirán a un mayor grado de concentración del capital del que ya existe, esto significará: i) que las grandes empresas mineras seguirán adoptando nuevas tecnologías en todas sus actividades y operaciones; ii) que la tendencia a la centralización del capital en la minería pudiera avanzar aún más; y iii) que las empresas mineras continuarán aumentando su índice de productividad y, eventualmente, sus tasas de ganancias.

Los informes anuales de la CAMIMEX no mencionan si existe una tendencia a la centralización del capital en la minería en México, no obstante, si reportan que la minería ha sido una de las actividades industriales más activas en materia de acuerdos, fusiones y adquisiciones durante los últimos años. De hecho, fue la primera que encabezó la lista en el año 2017. De un total de 220 operaciones formalizadas, el 20 % (45) las realizó la minería (CAMIMEX, 2018b, p. 35). Un ejemplo de estas operaciones ocurrió en el mes de noviembre, cuando Agnico Eagle Mines compró el proyecto de oro Santa Gerturdis ubicado en Sonora, perteneciente a la empresa Gogold Resources, por un valor de 80 millones de dólares. Con este nuevo proyecto Agnico Eagle Mines continúa situándose como una de las principales empresas productoras de oro en el país (CAMIMEX, 2018b, p. 36).

La concentración y centralización del capital conlleva una mayor dependencia tecnológica extranjera. Como se observa en el apartado anterior, muy pocos de los avances tecnológicos del presente siglo son desarrollo de la industria mexicana. La mayoría de los suplementos mineros son importados de países de origen o intermediarios.

En conclusión, la adquisición de equipo es uno de los rubros en que más ha invertido la gran minería en México, en promedio tuvo un valor de casi 22 % durante el periodo 2008-2017. Este rubro es uno de los factores que ha contribuido a concentrar y centralizar cada vez más el capital en la gran minería. La pequeña y mediana minería han sido desplazadas casi en su totalidad, en conjunto, producen menos del 5 % de los metales a nivel nacional.

4.3.2 Implicaciones laborales directas

La disminución del empleo en todos los niveles de calificación es uno de los signos más previsible de la automatización de los procesos industriales. Los sindicalistas mineros mexicanos ya han llamado la atención sobre este hecho, y han reclamado la necesidad de implementar nuevas políticas públicas para contrarrestarlo (Gómez Urrutia, 2018). En el otro extremo, los empresarios también han llamado la atención. El World Economic Forum señaló a comienzos del año 2017 que durante la próxima década se prevé entre un 4 y 5 % de desocupación de la fuerza de trabajo en la minería como resultado de la automatización de los procesos (World Economic Forum, 2017a, pp. 4 y 12).

Si se considera que en México existen 354 702 empleos en la minería (SGM, 2017, p. 22), un 4 % de desempleo significaría 14 188 trabajadores desempleados. Este porcentaje de desempleo puede ser significativo en poblaciones donde la actividad minera es la principal fuente de empleo. Sin embargo, en México, el empleo en la minería continúa creciendo, para el año 2016 se incrementó un 2.8 % más que el año anterior, una tendencia que se ha mantenido desde el año 2010 (SGM, 2017, p. 22). Esto se debe a que en los últimos años las empresas mineras han ampliado las reservas de minas activas, a través de la exploración de sus alrededores (CAMIMEX, 2018b, p. 31) y, además, como se mencionó, los proyectos mineros en etapa de producción continúan en aumento.

La sustitución de funciones humanas por máquinas y equipos y por un fuerte caudal de inteligencia artificial no es un proceso sencillo. Las empresas mineras han tenido dificultades para capacitar a los trabajadores en tecnologías digitales, acostumbrados a los sistemas mecánicos. Aparte, les ha sido difícil encontrar trabajadores capacitados tanto en sistemas digitales como en sistemas físico mecánicos (World Economic Forum, 2017a, p. 7). Esta falta de personal especializado ha obstaculizado en alguna medida la automatización de las grandes empresas mineras localizadas en países subdesarrollados, pues cada vez que se les descomponen un equipo de esta índole, tienen que recurrir a técnicos expertos en el extranjero, lo que se traduce en grandes pérdidas de tiempo y dinero.

Los procesos de automatización sustituyen en primer lugar, a los trabajadores de base, allí donde la máquina y/o el equipo puede realizar el mismo trabajo de forma más económica y/o eficiente o en lugares con condiciones ambientales adversas. Los perforistas más experimentados han sido sustituidos por equipos automatizados como la perforadora PV-351 de la marca Epiroc, una máquina que realiza de manera precisa cada una de sus operaciones sin agotarse, a diferencia de un perforista que va disminuyendo su rendimiento debido al cansancio, distracciones o meros errores (Epiroc, 2018; Mining & Construction, 2014).

En segundo lugar, la automatización sustituye al personal de supervisión, tanto por la reducción de los trabajadores de base como por la introducción de sistemas de control. Tal es el caso de la plataforma Mobilaris Mining Intelligence, un sistema que proporciona información 3D en tiempo real de todo el proceso minero, desde la posición de las máquinas, vehículos o personas hasta la operación de los sensores. Es un sistema que permite planear, supervisar y dar seguimiento a las distintas actividades de la minería (Mining & Civil Engineering, 2018).

En tercer lugar, la automatización sustituye a trabajadores calificados, en las distintas etapas del proceso minero. Así, por ejemplo, los geólogos especialistas en estimación de reservas minerales han sido desplazados por el uso de softwares como Gemcom - Gems, Vulkan 3D, Datamine, Leapfrog 3D, Geostat y Surpac. Estos softwares

estiman la cantidad de metales presentes en un yacimiento a través de cálculos geoestadísticos, una actividad que anteriormente se realizaba por métodos convencionales.

Aunque se trata de un tema controversial, es posible suponer que las nuevas tecnologías descalifican a los trabajadores calificados.³² Poco se habla sobre este proceso, basta con citar un ejemplo para entender que esta contrariedad existe: las determinaciones de metales eran realizadas tradicionalmente por químicos experimentados en técnicas analíticas vía húmeda y vía seca; cuando aparecen los primeros espectrofotómetros de absorción atómica, los químicos aún participaban en la calibración de los equipos. En la actualidad el manejo de este tipo de instrumento es tan simple que cualquier trabajador capacitado puede hacerlo, tal es el caso del espectrómetro de plasma con microondas 4210 MP-AES de la marca Agilent, un equipo con niveles de detección de ppb, que en un tiempo no mayor a 3 minutos analiza más de 30 elementos por muestra (Agilent Technologies, 2018).

Existe preocupación a nivel mundial por el impacto que las nuevas tecnologías pudieran ejercer sobre el empleo y el trabajo. La Confederación Europea de Sindicatos reconoce que la automatización y la digitalización pudieran traer consigo nuevos riesgos, como la creación de nuevos monopolios, el despido masivo de trabajadores, el espionaje de trabajadores, y el aumento del trabajo digital precario. Este organismo visualiza la necesidad de crear un nuevo contrato social en este nuevo ambiente tecnológico, donde los trabajadores sean los principales actores (R. Davies, 2015, p. 9).

En conclusión, es inminente la sustitución del trabajador por maquinaria y equipo en las diferentes etapas del proceso minero, aunque aún no se manifiesta en las estadísticas globales de empleo debido al aumento extensivo de la explotación. Esta sustitución se manifiesta tanto en puestos calificados como en puestos operativos. Las organizaciones mundiales manifiestan preocupación por el impacto que los nuevos desarrollos tecnológicos ejercerán sobre el empleo. En el caso de la minería este es un aspecto

³² Véase, por ejemplo, el caso del DAQRI (World Economic Forum, 2017a, p. 16).

preocupante debido a las continuas demandas que los trabajadores han manifestado en los diferentes medios.

4.3.3 Implicaciones ambientales

Los nuevos avances han propiciado una mayor autonomía y sincronización de los procesos mineros. El aumento de los índices de producción y la disminución de los costos de operación han sido los principales objetivos de los nuevos avances tecnológicos. No obstante, a la par ha habido mejoras en otras áreas como en la protección del ambiente. Si bien se han desarrollado tecnologías para tratar las aguas residuales, manejar los polvos o reducir el consumo energético, aún queda mucho por hacer, en lo que a minería se refiere.

El hecho de que las nuevas tecnologías sincronicen cada una de las fases del proceso ha traído consigo mayores tasas de explotación y procesamiento de minerales. Pero a la vez, ha generado un mayor consumo de insumos, dentro de los que destacan el agua y la energía, y una mayor generación de residuos, llámense jales, aguas residuales, gases efecto invernadero u otras sustancias químicas. Esta nueva transformación tecnológica ha llevado a la minería a un nuevo nivel de producción, donde el aumento de dimensiones se ha traducido en una mayor degradación ambiental. Este aumento de dimensiones sustentado en el desarrollo tecnológico se debe en gran medida al incremento de la demanda mundial de metales. Pero también obedece a la explotación de minerales de mayor complejidad, y con contenidos metálicos cada vez menores.

Aunque la tecnología actual puede coadyuvar a mitigar los impactos al ambiente, estos no pueden ser eliminados en su totalidad, dadas las cantidades de minerales extraídos y procesados que superan por mucho los registros históricos. Un ejemplo claro de cómo las nuevas tecnologías han facilitado la sincronización del proceso minero para aumentar el nivel de producción, disminuir los costos operativos, y de manera colateral beneficiar al ambiente, se encuentra en el uso de los explosivos. En la actualidad, las voladuras no sólo son utilizadas para fracturar la roca, sino para manejar la energía. Este nuevo estatus fractura la roca hasta un tamaño deseado y además, la desplaza a un lugar indicado (Dyno Nobel, 2019). Estas acciones ahorran capital a las empresas si se ejecutan correctamente,

de lo contrario acarrear costos para las etapas subsiguientes. Así, una mala explotación, puede generar fragmentos de roca grandes, que tendrían que reprocesarse para poder ingresar a la etapa de molienda y, con ello, se generaría un mayor consumo de explosivos y de emisiones a la atmósfera. A la par, si la roca no se desplaza al lugar indicado, los movimientos anexos utilizarían mayor cantidad de combustible y generarían mayor cantidad de emisiones al ambiente.

Las voladuras son iniciadas con sistemas electrónicos de detonación programables como el *DigiShot Plus 4G Electronic Initiation System*, que puede detonar hasta 16 000 barrenos en una sola programación (Dyno Nobel, 2018). Lo interesante de este sistema es que antes de realizar una voladura, ésta se puede simular en un software de tres dimensiones, donde se visualiza la fragmentación de la roca, y la vibración que se pudiera generar. La voladura llevada a la realidad posee de un 90 a un 95 % de correspondencia con la simulación. En tiempo, este sistema puede llegar a detonar hasta 400 barrenos en 30 segundos (Dyno Nobel, 2019).

Un ejemplo de cómo las nuevas tecnologías han propiciado ahorros energéticos y beneficios para el ambiente se encuentra en los nuevos sistemas de ventilación. Tradicionalmente, la ventilación normal llega a consumir hasta el 70 % del total de la energía de una mina subterránea, es una de las actividades más costosas. Los actuales sistemas de ventilación monitorean continuamente el nivel de dióxido de carbono dentro de una mina, y se accionan sólo cuando detectan que este contaminante se encuentra por arriba de los límites establecidos. Esta acción conlleva un gran ahorro energético y, además, disminuye las emisiones indirectas al ambiente (Epiroc, 2019b).³³ El consumo energético del sistema de ventilación se reduce aún más si se utilizan equipos eléctricos para carga, perforación y transporte. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, estos equipos no generan emisiones contaminantes durante su operación y, por lo tanto, los costos de operación del sistema de ventilación disminuyen (Epiroc, 2019a).

³³ Las emisiones indirectas son los gases o compuestos de efecto invernadero que se generan fuera de las empresas como consecuencia del consumo de energía eléctrica y térmica (DOF, 2014d, p. 1, art. 2).

Otro ejemplo de cómo las tecnologías pueden reducir un impacto ambiental en la fuente de origen es la reducción del consumo de agua en el proceso de perforación. Normalmente las máquinas de barrenación cuando perforan la roca requieren de agua, las nuevas tecnologías de EPIROC detectan su existencia cuando barrenan una cavidad, lo que las hace regular el flujo de este líquido y reducir su consumo (Epiroc, 2019b).

Los nuevos sistemas de control y automatización también ofrecen un monitoreo de los impactos ambientales, como Dispatch. Un sistema presente en el mercado desde 1979, en sus inicios se creó para solucionar cuestiones operativas relacionadas con el transporte (Oyarzún Montalva, 2001, p. 140). Con el transcurso de los años se desarrollaron aplicaciones anexas a este sistema, transformándolo en una plataforma de gestión minera más que en una herramienta operativa (Oyarzún Montalva, 2001, p. 141). Hoy en día, Dispatch es utilizado por empresas mineras como Peñasquito para el desarrollo de múltiples funciones operativas dentro de las cuales se encuentra el monitoreo de algunos impactos ambientales, el cuadro siguiente muestra algunos de sus usos.

Cuadro 28 Monitoreo de algunos impactos ambientales por Dispatch

Elemento	Parámetro	Acción	Resultado
Aire	Polvos PM10 y PM2.5	Medición de parámetros por equipos especializados y envió de datos a Dispatch para su control	Normativo
Fauna	Fauna en caminos	Detección de fauna en caminos por los operadores y envió de datos a Dispatch para su captura y reubicación	Normativo
Suelo	Derrames en suelo	Detección por los operadores y envió de datos a Dispatch para su control	Normativo
Suelo	Deslizamientos de taludes	Detección por robots y envió de datos a Dispatch para su control	Normativo

Fuente: elaboración propia con datos de Minera Peñasquito (2019).

Los depósitos de jales también han adoptado sistemas de monitoreo de impactos ambientales, tal es el caso de la mina Peña Colorada, donde se han adoptado piezómetros para medir el nivel del agua, inclinómetros para medir los movimientos subterráneos, estaciones robóticas para medir los movimientos superficiales, estaciones meteorológicas

para medir parámetros climáticos, acelerógrafos para medir los movimientos sísmicos, y el satélite para medir los asentamientos (desplazamientos verticales) (Reyes, 2019).

La minería es una de las ramas industriales más tecnificadas, pero a la vez es una de las que más conflictos sociales, ambientales y económicos enfrenta con los pobladores de las comunidades o con los trabajadores. Muchos de estos conflictos han sido documentados en varios sitios web, como Mines and Communities (MAC). Un sitio que tenía documentados 343 conflictos en México hasta finales del año 2019 (MAC, 2019). También, el Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL) tenía documentados 45 casos en este país en esta fecha. De hecho, México ocupa el segundo lugar de toda América Latina en este último sitio (OCMAL, s/f).³⁴

Si se contrasta la información proveniente de las empresas y los técnicos con la de las instituciones que registran las demandas de los trabajadores y las comunidades en contra de la minería, referente a que los impactos ambientales se reducen con los nuevos avances tecnológicos, resultan dos versiones diferentes del mismo proceso. Esta contradicción no necesariamente significa que alguna de las versiones es errada, lo más probable es que ambas sean correctas dentro de las limitaciones de los enfoques.

En conclusión, las nuevas aplicaciones tecnológicas están enfocadas a objetivos discretos de la actividad minera. Si bien estas han permitido explotar y beneficiar un mayor volumen de minerales, los beneficios que pudieran generar en pro del ambiente se pueden contrarrestar por el solo hecho de manejar estos grandes volúmenes. Esto ha motivado a que muchas de las comunidades aledañas a las unidades mineras se quejen por la disminución de las reservas de agua, el aumento de los polvos provenientes de los movimientos de material, la apertura de caminos, el aumento de los jales, la modificación del paisaje, entre otros aspectos que provocan afectaciones significativas a los ecosistemas existentes.

³⁴ Véase al respecto los sitios web siguientes donde se documentan diferentes tipo de conflictos mineros incluyendo los laborales: <https://www.facebook.com/MICLA-675191549245839/>, <https://www.ocmal.org/> y <http://www.remamx.org/>

La legislación ambiental mexicana aún no considera este aumento de dimensiones, se fundamenta en el análisis del riesgo, de manera que una actividad no se regula hasta que se demuestre que provoca efectos adversos sobre el ambiente. En tanto que las comunidades se basan en la experiencia práctica e histórica, fundamento del principio de precaución, que trata de impedir el desarrollo de actividades que no se sabe si afectarán el ambiente.

CAPÍTULO 5 LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL Y LA MINERÍA DE MÉXICO

En el presente capítulo se explica cómo ha evolucionado la legislación ambiental en México, cuales han sido los problemas de su aplicación y cómo ha contribuido a aumentar la degradación en el ambiente. Desde el comienzo de la historia de México como país independiente, siempre han existido disposiciones ambientales. Aunque en gran medida, su desarrollo se encontraba a merced de los gobernantes en turno, a pesar de que ya se percibían efectos de la degradación ambiental.

La adhesión de México a organismos multilaterales como el GATT (1986), la OCDE (1994), y la OMC (1995), así como, la negociación del TLC (1993) y del ACAAN (1993), transformaron los procesos legales y políticos de México desde finales de los ochenta. Dichos procesos han tratado de que el sistema legal mexicano sea más descentralizado, flexible, transparente y responsable, sin embargo, en la práctica su aplicación se ha caracterizado por ser compleja, legalista e inflexible. En el ámbito ambiental el sistema ha adoptado los principios base de las Conferencias Mundiales sobre el Medio Ambiente organizadas por Naciones Unidas. Una acción que pretende hacer más estrictas las regulaciones ambientales, sin embargo, en la práctica éstas han favorecido el incremento de la degradación ambiental y protegido los intereses económicos de las empresas mineras, como se verá en los siguientes apartados.

5.1 Desarrollo de la legislación ambiental

Carabias y Rabasa en su artículo: *Cien años de políticas y normatividad ambiental*, dividen el desarrollo de la legislación ambiental en seis periodos. Para tener un panorama general de la evolución de la legislación ambiental en México, en el cuadro siguiente se presenta un breve análisis.

Cuadro 29 Evolución de la legislación ambiental mexicana

Periodo	Principales instrumentos jurídicos ambientales desarrollados en el periodo	Carácter del periodo	Conclusión general
1917-1934	Artículo 27 Constitucional (1917) Ley Forestal (1926) Ley de Aguas de Propiedad Nacional (1929)	Aprovechamiento de los recursos naturales	Las políticas se concentraban en la formación del Estado nacional. Las políticas de protección al ambiente no figuraron como parte de las políticas de desarrollo.
1934-1940	Ley de Aguas de Propiedad Nacional (1934)	Reparto agrario e inicio de la conservación de los recursos naturales	
1940-1964	Ley de Conservación del Suelo y el Agua (1946)	Estancamiento de las políticas ambientales	El Estado consolida una economía mixta. Las políticas de protección al ambiente no figuraron como parte de las políticas de desarrollo.
1965-1982	Ley Federal de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental (1971)	Comienzo de las políticas ambientales	El Estado continua la consolidación de la economía mixta, aunque a la mitad de este periodo el modelo muestra ya un agotamiento. Las políticas ambientales acompañan la preocupación internacional por el deterioro ambiental.
1982-1994	Ley Federal de Protección al Ambiente (1982) Ley General del Equilibrio y la Protección al Ambiente (1988) Ley Federal sobre Metrología y Normalización (1992) Ley de Aguas Nacionales (1992)	Establecimiento de las bases de la política ambiental	Inició de las políticas neoliberales. La legislación ambiental pasa de criterios diversos como agua suelo y aire, a conceptos más complejos como equilibrio ecológico, ordenamiento ecológico y análisis de riesgo. Inicia la conformación de las instituciones encargadas de aplicar las políticas ambientales.
1994-hasta la fecha	Ley General de Vida Silvestre (2000) Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2003) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003) Ley General de Cambio Climático (2008) Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (2013)	Comienzo de la integración del desarrollo sustentable en las políticas de desarrollo Incorporación de conceptos cívicos a la problemática ambiental como responsabilidad ambiental y derechos ambientales	La legislación facilita el desarrollo de las políticas neoliberales e incorpora elementos de los convenios y tratados internacionales, entre ellos los más importantes el TLC y el ACAAN. Los instrumentos de política ambiental se perfeccionan.

Fuente: elaboración propia con datos de Carabias y Rabasa (2017) y Tello (2008), aunque el contenido de las columnas es criterio de la autora.

En el primer periodo (1917 – 1934), la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917 estableció de manera revolucionaria, que el aprovechamiento y la conservación de los recursos naturales por causa de interés público es una de las principales

prioridades de México (Carabias & Rabasa, 2017, p. 50). En su primera versión, el artículo 27 estableció que:

La Nación tendrá en todo tiempo el derecho de [...] regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. Con este objeto, se dictaran las medidas necesarias para [...] evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad (DOF, 1917, p. art. 27 tercer párrafo).

Si bien estas disposiciones fueron relevantes para su tiempo, la historia muestra que después de cien años no ha sido posible cumplirlas, a pesar del gran desarrollo de la legislación. Por el contrario, la destrucción de los recursos naturales continúa al igual que la riqueza se reparte en unas pocas empresas nacionales y transnacionales.

En ese periodo se promulgó y reivindicó la primera Ley Agraria (1915) y otros ordenamientos en la materia que sustentaron la reforma agraria. Un proceso que se concentró en la repartición del suelo para dar estabilidad social y encaminar el desarrollo agropecuario. Sin embargo, aceleró el deterioro ambiental debido a que no consideró la conservación de las zonas forestales (Carabias & Rabasa, 2017, p. 51). Si bien para 1926 se promulgó la primera Ley Forestal, cuyo objeto era conservar, restaurar, propagar y aprovechar la vegetación forestal, en la práctica estas acciones no fueron parte de las políticas de Estado, por lo que sus disposiciones quedaron en el olvido (Carabias & Rabasa, 2017, p. 52).

En materia de agua, la primera Ley de Aprovechamiento del Aguas de Jurisdicción Federal del siglo pasado se promulgó en el año de 1910 cuando Porfirio Díaz era aún el presidente. Esta ley se acompañó de la Ley Federal sobre Uso y Aprovechamiento de las Aguas Públicas (1917) y la Ley sobre Irrigación con Aguas Federales (1926). Esta última ley creó la Comisión Nacional de Irrigación. Posteriormente, la Ley de Aguas de Propiedad Nacional promulgada en 1929 y reformada en los años 1930 y 1934, abrogó estas leyes. Esta nueva ley delimitó con mayor precisión el andamiaje institucional para la regulación de este líquido (Carabias & Rabasa, 2017, p. 53). En su versión original sus disposiciones sólo se enfocaron en reivindicar la propiedad y el aprovechamiento de este vital líquido.

En este periodo también se promulgó el Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos de 1926, el cual derogó el Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos de 1902. La legislación sanitaria es una de las legislaciones que siempre ha estado presente en México desde la época prehispánica (Carrillo, 2002, p. 68). Si bien es cierto que su enfoque siempre ha sido la regulación de la salud e higiene, los códigos sanitarios generalmente incluyeron un capítulo de ingeniería sanitaria donde se consideraban algunas medidas ambientales. De hecho, las autoridades sanitarias se encargaron de coordinar las regulaciones ambientales hasta principios de los años ochenta después de que aparece la segunda ley ambiental de México. El siguiente artículo del Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos de 1926 es una muestra de estos hechos, en él, las empresas son obligadas a tratar las aguas residuales que se reúsen por la población.

Artículo 277.-Las empresas mineras, industriales o de cualquiera otra clase, que aprovechen en sus servicios aguas de jurisdicción federal, que puedan ser posteriormente usadas por las habitantes de alguna población, estarán obligados a devolver las aguas usadas, sin contaminación alguna que pueda ser perjudicial a la salud y a los bienes propios de dichos habitantes. Las empresas serán, civil y criminalmente, responsable de los daños y perjuicios que originen por la falta de cumplimiento a lo ordenado en este artículo (DOF, 1926, p. 597 art. 277).

El segundo periodo (1934 – 1940) se caracterizó por el auge en el reparto agrario y el inició de la conservación de los recursos naturales. El objetivo principal de este periodo al igual que el anterior fue apoyar el desarrollo económico para consolidar un Estado nacional. Sin embargo, se vislumbraron algunas acciones en pro de la conservación de los recursos naturales. El presidente Cárdenas creó el Departamento Autónomo Forestal, de Caza y de Pesca, a cargo de Miguel Ángel de Quevedo, el cual promovió la protección de áreas estratégicas forestales. A finales de 1940, el 30 % del territorio nacional se encontraba protegido, una acción sólo una vez vista en la historia de México, no obstante, este departamento fue cerrado en 1940 (Carabias & Rabasa, 2017, p. 54).

En este periodo, se promulgó la Ley de Aguas de Propiedad Nacional de 1934 y se derogó la anterior de 1929 con el mismo nombre. Esta nueva ley introdujo cambios significativos en la gestión de este líquido.

En esta legislación, por primera vez, se regularon los distintos usos del agua mediante concesiones; se ordenó el funcionamiento de sociedades de usuarios de aguas y de juntas;

se previó el establecimiento de reservas para generación de energía eléctrica y se consignaron en ellas normas procesales para el desahogo de recursos, trámite de concesiones, faltas y delitos (Juárez Villaseñor et al., 2015, p. 59).

También incluyó algunas disposiciones para no contaminar este líquido como castigos administrativos por verter jales procedentes de las plantas de beneficio.

Son faltas que la Secretaría castigará administrativamente: I.- Arrojar a los cauces de propiedad nacional, jales o lamas de las plantas beneficiadoras de metales, basuras, colorantes o sustancias de cualquier naturaleza que perjudiquen el cauce o terrenos de labor, o que contaminen las aguas haciéndolas dañosas para la salud de las personas o animales; o perjudiciales para la pesca, la agricultura o la industria (DOF, 1934, pp. 1246–1247 art. 108).

En resumen, en estos dos últimos periodos posteriores a la Revolución Mexicana, las políticas nacionales se concentraron en fomentar la paz interna y estabilizar al país. La recuperación de la economía, la atención de las demandas de la población como el reparto agrario, y la consolidación de las relaciones con Estados Unidos fueron elementos clave en esta nueva etapa (Tello, 2008, p. 29). Las políticas de protección al ambiente no figuraron como parte de las políticas de desarrollo. Las preocupaciones del Estado no estaban dirigidas en este sentido. Las pocas regulaciones ambientales que se generaron prácticamente no se aplicaron y, sólo se centraron en el aprovechamiento y conservación de la tierra y del agua, y en el incipiente inicio de la gestión forestal.

El tercer periodo (1940 – 1964) se caracterizó por el estancamiento del desarrollo de las políticas ambientales, en especial el interés por la conservación de los recursos naturales disminuyó. El reparto agrario se desaceleró en este periodo. El Estado inició a consolidar una economía mixta, los apoyos gubernamentales y las inversiones públicas y privadas se incrementaron en diversas áreas productivas como la agrícola. Una área donde el deterioro ambiental se acentuó debido al aumento del uso de agroquímicos y la ocupación de más superficies de aptitud forestal (Carabias & Rabasa, 2017, p. 56).

En pro de conservar la tierra y el agua para la agricultura, el presidente Ávila Camacho creó el Departamento de Conservación de Suelos dentro de la Comisión Nacional de Irrigación en 1942 y, posteriormente, se promulgó la Ley de Conservación del Suelo y el Agua (1946). Los resultados de esta legislación no fueron trascendentales, dado que en este periodo también se establecieron las bases de la ganaderización en el país, lo que aceleró

los procesos de deforestación (Carabias & Rabasa, 2017, p. 56). Por su parte, la explotación forestal se concesionó a empresas privadas a cambio de un pago a los ejidatarios dueños de las tierras y, además, hubo decretos para reducir los linderos de algunas áreas naturales protegidas. Si bien al final de este periodo hubo propuestas para reorientar la política forestal y detener la destrucción de los ecosistemas, estas no tuvieron eco. Finalmente, la ley forestal se reformó para eliminar los obstáculos tendientes a afectar la producción forestal (Carabias & Rabasa, 2017, p. 57).

En materia de aprovechamiento de agua, este periodo fue muy activo en lo que se refiere a la promulgación y abrogación de leyes: i) se expidió la Ley de Aguas de Propiedad Nacional en 1946, la cual derogó a la de 1929; ii) se promulgó la Ley Reglamentaria del Párrafo Quinto del Artículo 27 Constitucional en Materia de Aguas del Subsuelo en 1948, la cual fue sustituida por otra con el mismo nombre en 1956; iii) se promulgó la Ley Federal de Ingeniería Sanitaria en 1948; y iv) se expidió la Ley de Cooperación para Dotación de Agua Potable a los Municipios en 1956.

El Código Sanitario de 1926 y el posterior de 1949 fueron derogados por el nuevo Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos de 1955. Este nuevo instrumento jurídico al igual que los anteriores incluía algunas medidas en relación a la contaminación ambiental como el artículo 115 del capítulo IV de Ingeniería Sanitaria, donde se dictaba la “ejecución de obras relacionadas con el alejamiento, tratamiento y destino de los desechos, sean o no conducidos por sistemas de alcantarillado” (DOF, 1955, p. 10).

En este último periodo, las políticas de conservación de los recursos naturales tampoco figuraron como parte de las políticas de desarrollo. El Estado se enfocó en acelerar el crecimiento del país, a través de la consolidación de una economía mixta donde gran parte de las inversiones públicas se destinaban al sector privado. Esta etapa protegió a la industria de la competencia externa a través de la imposición de aranceles proteccionistas y controles cuantitativos a la importación, y del otorgamiento de apoyos económicos vía gobierno. Esto dio lugar a una industria lucrativa pero muy costosa, y poco articulada con el exterior (Tello, 2008, pp. 297, 298, 318 y 319).

El cuarto periodo (1965 – 1982) se caracterizó por la destrucción de los trópicos y el comienzo de las políticas ambientales. En este periodo, el auge agrícola ya se había deteriorado y, México comenzó a recurrir a las importaciones de alimentos. En contraste la demanda de cárnicos comenzó a aumentar y a dinamizar este mercado. En un primer momento se pensó que estos proyectos ganaderos serían exitosos. Empero, con el tiempo sólo se convirtieron en ganadería extensiva y poco productiva que llegó a deforestar más de tres millones de hectáreas de selva durante los años sesenta y setenta. En materia forestal, la legislación se reformó para cancelar las concesiones privadas y dar paso a las paraestatales. Un aspecto que no contribuyó a disminuir el deterioro de los recursos forestales (Carabias & Rabasa, 2017, pp. 57–58). También, se promovieron los decretos de la Reserva de la Biosfera obedeciendo a la creación del programa El Hombre y La Biosfera de la UNESCO, y a la formación de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera (Carabias & Rabasa, 2017, p. 59).

Este periodo estuvo influenciado por la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano (1972) realizada en Estocolmo. En la fase preparativa de este evento, se expidió la primera ley ambiental de México, la Ley Federal de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental (1 de marzo de 1971) (Carabias & Rabasa, 2017, p. 59). No obstante, no tuvo validez legal por unos meses hasta que se publicó su fundamento constitucional el 6 de julio de 1971. El cual consistió en la reforma de la fracción XVI del artículo constitucional 73 para facultar al Consejo de Salubridad General para emitir medidas para prevenir y combatir la contaminación ambiental (Carmona Lara, 1995, p. 233).

Aunque esta nueva ley era de jurisdicción de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, su objeto de estudio estaba bien definido, la regulación, el control y la prohibición de los contaminantes y sus causas, que en forma directa o indirecta pudieran degradar los ecosistemas. Bajo esta ley se promulgó el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica, Originada por Humos y Polvos (1971), el Reglamento de Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas (1973), el Reglamento de Prevención y Control de la Contaminación por Ruidos (1976), y el Reglamento de prevención y Control de Vertimiento al Mar (1979) (Carmona Lara, 1995, p. 233).

Antes de realizarse la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano (1972) se expidió la Ley Federal de Aguas de 1972, y se abrogó la Ley de Aguas de Propiedad Nacional de 1946. Esta nueva ley fue reformada tres veces, en el mismo año que aparece, en 1975 y en 1986. En su versión original declaraba de utilidad pública la prevención y control de la contaminación de las aguas en los términos propuestos por ley ambiental recientemente publicada (DOF, 1972, p. 11 art. 2 inciso XXI).

En este periodo el Código Sanitario de 1955 se abrogó para dar paso al nuevo Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos de 1973, donde se establecieron disposiciones para el saneamiento del ambiente en materia de atmósfera, suelo, agua, mar territorial, radiaciones ionizantes, electromagnéticas e isótopos radiactivos, poblaciones, edificios y construcciones, vías generales de comunicación y transportes, y de los cadáveres. El artículo 44 mencionaba que:

La Secretaría de Salubridad y Asistencia realizará actividades de mejoramiento, conservación y restauración del medio ambiente tendiente a preservar la salud, así como de prevención y control de aquellas condiciones del ambiente que perjudican a la salud humana. El Consejo de Salubridad General dictará disposiciones generales sobre estas materias (DOF, 1973, p. art. 44).

Las políticas ambientales de México iniciaron durante este cuarto periodo con la promulgación de la primera ley ambiental y, además, acompañaron la preocupación internacional por el deterioro ambiental manifestada en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano (1972). Posiblemente en este periodo el gobierno también comenzó a crear conciencia de este fenómeno debido a que México dejó de ser una economía predominantemente agrícola y rural para transformarse en una urbana e industrial (Tello, 2008, p. 452). El modelo económico de ISI jugó un papel estratégico en este sentido sobre todo entre 1940 y 1970, antes de comenzar a desmoronarse (Tello, 2008, p. 460).

En el quinto periodo (1982 – 1994), la adhesión de México a diversos organismos multilaterales y la negociación del TLC a principios de los años noventa sentaron las bases de la política ambiental actual. Este periodo constituye el inicio de las políticas neoliberales

en México, caracterizadas en gran medida por la apertura a las grandes empresas transnacionales.

Al inicio de este periodo, se gestaron varios hechos que dilucidaron el rumbo de las políticas ambientales, el primero fue la promulgación de la Ley Federal de Protección al Ambiente (1982) y, su posterior reforma en 1984; el segundo fue la reforma del artículo 25 de la Constitución para incluir el cuidado del medio ambiente: “Bajo criterios de equidad social y productividad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente” (DOF, 1983a, p. 4); el tercero fue la incorporación de criterios ecológicos en el Plan Nacional de Desarrollo de 1983 – 1988, el cual proponía revertir el manejo inadecuado de los recursos naturales, y la interacción irracional con el ambiente (DOF, 1983b, p. 41); y quinto, la firma del Convenio sobre Cooperación para la Protección y Mejoramiento del Medio ambiente en la Zona Fronteriza (1983), entre Estados Unidos y México.

Cuando se publica la Ley Federal de Protección al Ambiente (1982) en el DOF aparece aún a cargo de la Secretaría de Salubridad y Asistencia y, además, abroga a la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (1971). Esta nueva ley no tenía reglamentos propios por lo que su implementación no fue del todo posible. Además, su fundamento constitucional era endeble porque el Congreso de la Unión no estaba facultado para expedir leyes en materia ambiental. No obstante, en su estructura ya contemplaba algunos avances legales importantes que hasta la fecha son observados, como el ordenamiento ecológico del territorio, el establecimiento de una política ambiental nacional y la manifestación del impacto ambiental (Carmona Lara, 1995, p. 233).

Luego de la publicación de esta nueva ley, se modificó la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal para crear la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) (1982), en cuya estructura se estableció la Subsecretaría de Ecología encargada de formular la política ambiental (Carabias & Provencio, 1994, p. 10). Con estos pasos, la legislación ambiental dejó de formar parte de la legislación sanitaria para crear sus propias estructuras legales, las cuales se reforzaron en 1987, una vez que se reformaron los artículos

constitucionales 27 y 73 (Carmona Lara, 1995, p. 233). El artículo 27 incorporó la dictaminación de “medidas necesarias [...] para preservar y restaurar el equilibrio ecológico” (DOF, 1987, p. 10), y el artículo 73 añadió el párrafo XXIX-G que faculta al Congreso de la Unión para “expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico” (DOF, 1987, p. 10).

Estas reformas constitucionales permitieron más tarde promulgar la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1988) (LEGEEPA). La tercera ley ambiental de México, ícono de la política ambiental actual que se considera general por la gran gama de temas que regula. Esta ley se promulgó después de la publicación del Informe Brundtland (1987) donde apareció por primera vez el término de desarrollo sustentable. En este periodo México inició a firmar convenios ambientales dentro de los que destacan el Convenio para la Protección de la Capa de Ozono (1985), el Acuerdo de Cooperación sobre Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y Sustancias Peligrosas (1986), el Protocolo de Montreal relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (1987), y el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación (1989).

La LEGEEPA se estructuró alrededor de cuatro aspectos: política ecológica, manejo de recursos naturales, protección al ambiente y participación social (Carmona Lara, 1995, p. 240). Además, se acompañó de la expedición del Reglamento de la LEGEEPA en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental (2000), del Reglamento de la LEGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos (1988), del Reglamento de la LEGEEPA en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (1988), y del Reglamento de la LEGEEPA para la prevención y control de la contaminación generada por los vehículos automotores que circulan por el Distrito Federal y los municipios de su zona conurbada (1988).

Casi un año después de la publicación de esta ley, en 1989 se crea la Comisión Nacional del Agua (CNA), un organismo federal desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, que años más tarde pasaría a formar parte de las

autoridades ambientales. Esta institución se constituyó como la principal autoridad en México en materia de regulación del agua y se fortaleció con la promulgación de la Ley de Aguas Nacionales de 1992, la cual derogó la Ley de Aguas de Propiedad Nacional de 1972.

Si bien la LEGEEPA inició una nueva política ambiental, ésta se robusteció cuando México firmó el TLC (1993) y otros convenios y tratados ambientales, y cuando se adhirió activamente a varios organismos multilaterales como la OCDE (1994) y la Organización Mundial del Comercio (OMC) (1995) como miembro fundador.³⁵

Para facilitar el ingreso del capital internacional se publicaron diversas leyes, dentro de las que se encuentran la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN) (1992), la Ley de Inversión Extranjera (1993), la Ley Federal de Competencia Económica (1993), y la Ley de Fomento y Protección a la Propiedad Industrial (1991). En especial, la LFMN sentó las bases para la elaboración de normas oficiales mexicanas de carácter obligatorio (NOM) y normas mexicanas con carácter no obligatorio (NMX), y para la evaluación de la conformidad (OMC, 1997).³⁶

En el contexto de la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992, mejor conocida como la Cumbre de Río, la SEDUE fue reemplazada por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). Esta secretaría abordó de manera conjunta el tema social y ambiental en alusión a esta cumbre. Otros cambios importantes en este periodo fueron la eliminación de la Subsecretaría de Ecología y la creación de los siguientes órganos: i) el Instituto Nacional de Ecología (INE) (1991) encargado de formular la política ambiental; ii) la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPa) (1992) encargada de verificar el cumplimiento de la legislación (Carabias & Rabasa, 2017, p. 61); y iii) la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1992), una comisión

³⁵ La OMC fue creada para liberalizar el comercio, sus objetivos vienen de las negociaciones celebradas en el marco del GATT durante el periodo 1986 – 1994 (denominada Ronda Uruguay). La OMC está constituida por un grupo de acuerdos negociados y firmados por la mayoría de los países que participan en esta organización (OMC, 2015, p. 9).

³⁶ Se entiende por evaluación de la conformidad, “la determinación del grado de cumplimiento con las normas oficiales mexicanas o la conformidad con las normas mexicanas, las normas internacionales u otras especificaciones, prescripciones o características. Comprende, entre otros, los procedimientos de muestreo, prueba, calibración, certificación y verificación” (DOF, 2018e, p. 2 art. 3).

intersecretarial encargada de proponer las políticas sobre biodiversidad, siendo el presidente en turno el titular de esta institución (Carabias & Rabasa, 2017, p. 62).

La SEDESOL inició la operación de acciones preventivas y correctivas como la evaluación del impacto ambiental de casi cinco mil proyectos de inversión, el inventario de 763 empresas con actividades de riesgo y, en lo conducente se elaboraron los programas de prevención de accidentes. Por su parte, la PROFEPA inspeccionó 34 000 industrias y áreas naturales protegidas, y dio las facilidades para el desarrollo de 140 auditorías ambientales a empresas privadas y públicas (Salinas de Gortari, 2000, p. 393). También, se promovió la introducción de tecnologías anticontaminantes, se estableció que las inversiones en estos equipos se podían deducir en un 50 % de los resultados fiscales (Salinas de Gortari, 2017, p. 395).

En el sexto periodo (1994 - hasta la fecha) comenzó de manera más cercana la integración del desarrollo con las políticas ambientales. En este periodo inició el auge del TLC, el primer acuerdo comercial que integró la protección del ambiente, y del ACAAN. En este último acuerdo, se establecieron varios de los instrumentos de política ambiental que México ha seguido durante las últimas tres décadas, como las visitas de inspección, las publicaciones periódicas sobre los procedimientos para aplicación de leyes, las auditorías ambientales, la solicitud de registros e informes, el otorgamiento de licencias, permisos y autorizaciones, los procedimientos judiciales y los procedimientos administrativos (DOF, 1993b).

A finales de 1994 se creó la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), una dependencia que por primera vez conjuntó la administración de varios elementos, como los recursos pesqueros, forestales e hídricos, la protección de los ecosistemas y la prevención y control de la contaminación. Algunos de los cuales se encontraban regulados por instancias agropecuarias (Carabias & Rabasa, 2017, p. 62). Posteriormente, en el 2000 se modificó la Ley de la Administración Pública Federal y la SEMARNAP transfirió la regulación de las actividades de pesca a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y se transformó en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Asimismo, durante el 1996, se fortaleció la base jurídica ambiental, “se reformó sustancialmente la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, con lo que se racionalizó el esquema de declaraciones de impacto ambiental, se permitió la introducción de permisos comerciables y se delimitaron claramente las jurisdicciones federal, estatal y municipal” (OCDE, 2000, p. 18).

Dentro de estas reformas, la LEGEEPA incluyó el término de desarrollo sustentable, el artículo primero dispone que “sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable” (DOF, 1996b, p. 6 art. 1). Esta nueva visión del desarrollo se reforzó en 1999, con la modificación de los artículos constitucionales 4 y 25 para incluir el término de desarrollo sustentable. En el artículo 4 se especificó que “toda persona tiene el derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar” (DOF, 1999, p. 2); y en el 25, se estableció que “corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que este sea integral y sustentable” (DOF, 1999, p. 2).

Después de todos estos cambios regulatorios e institucionales, a partir del 2000, comenzaron a expedirse leyes ambientales en diversos ámbitos para conformar la legislación ambiental. Dentro de estas leyes se encuentran las siguientes en sus primeras versiones: la Ley General de Vida Silvestre (2000), la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2003), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2003) y la Ley General de Cambio Climático (2008). Esta nueva estructura legislativa también ha motivado el desarrollo de legislaciones ambientales estatales y municipales (Carabias & Rabasa, 2017, p. 63).

El artículo 4 constitucional se volvió a reformar en el 2012 para hacer hincapié no en un ambiente adecuado sino en uno sano, estableciendo así que “toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley” (DOF, 2012b, p. 5). Esta nueva reforma también estableció las bases para expedir la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (2013), la cual en su artículo primero establece:

La presente Ley regula la responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, así como la reparación y compensación de dichos daños cuando sea exigible a través de los procesos judiciales federales previstos por el artículo 17 constitucional, los mecanismos alternativos de solución de controversias, los procedimientos administrativos y aquellos que correspondan a la comisión de delitos contra el ambiente y la gestión ambiental (DOF, 2013b, p. art. 1).

Esta nueva ley promovió una intervención más dinámica del Poder Judicial de la Federación en lo que se refiere a la reparación y compensación de daños ambientales. El artículo 30 de este ordenamiento establece que este poder contará con juzgados de Distrito para atender de manera exclusiva los procesos en materia ambiental (DOF, 2013b). En este nuevo contexto, los delitos ambientales tienen mayores oportunidades de ser sancionados no sólo por la vía administrativa sino también por la judicial. A parte de la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental se tienen otras disposiciones legislativas que en conjunto orquestan el derecho a un medio ambiente sano, como el Código Penal Federal (2019) que en el título vigésimo quinto establece los delitos contra el ambiente y la gestión ambiental (DOF, 2019c).

En resumen, desde que se pronunció la Constitución Política de 1917 se comenzó a regular la conservación de los recursos naturales en México, no obstante, en la práctica estas disposiciones no fueron prioritarias ni tampoco se aplicaron en toda su dimensión. En todos los periodos analizados la jurisprudencia se hizo presente, si bien sus resultados no fueron trascendentales, las disposiciones legales se ajustaron en todo momento al nivel de desarrollo de las fuerzas productivas y de los conflictos sociales. Así, por ejemplo, impactos ambientales evidentes como la deforestación y la contaminación de los cursos de agua fueron incorporados tempranamente.

Posteriormente, y debido al impacto de las relaciones internacionales en el periodo neoliberal, el sistema legal adoptó diversas disposiciones que reprodujeron las tendencias internacionales en cuanto a la explotación de recursos naturales se refiere. Ante todo, el sistema legal se ha ajustado a los tratados de libre comercio, los cuales apoyan la privatización de los recursos naturales, su extracción ilimitada y la externalización de los impactos ambientales.

5.1.1 La aplicación de la legislación ambiental

Durante la mayor parte del siglo XX, el Estado mexicano fue identificado como un sistema de partido único gobernado por el Partido Revolucionario Institucional (PRI), burocrático, jerárquico y centralizado. El presidente líder del PRI y los secretarios ejercían su poder casi absoluto en los estados y en los municipios, así como, en las cámaras de Senadores y Diputados y en la Suprema Corte de Justicia. El presidente nombraba a todos los miembros del gabinete y a los titulares de las secretarías y de otros organismos. No existía servicio civil de carrera en toda la administración pública. Las propuestas legales eran desarrolladas por un grupo de funcionarios, las cuales después de ser firmadas por el presidente eran aprobadas y promulgadas inmediatamente por el Congreso, el cual se integraba en su mayoría por militantes del PRI (OCDE, 2000, pp. 12–13). Esta práctica dejó de desarrollarse desde finales de los noventa cuando la Cámara de Diputados dejó de estar conformada en su mayoría por militantes del PRI (OCDE, 2000, p. 15); y, cuando México, comenzó a poner en práctica los compromisos internacionales acaecidos durante los ochenta y los noventa.

Desde que se promulgó la LGEEPA (1988), México comenzó a desarrollar de una manera más estructurada su sistema legal ambiental, incluyendo diversos instrumentos de política en la materia como las manifestaciones de impacto ambiental. A la par ha desplegado todo un sistema de competencias ambientales para acoger a la federación, a los estados y a los municipios. La legislación ambiental se organizó jerárquicamente sobre una estructura piramidal donde en la cima se encuentra la Constitución, y abajo los tratados internacionales, las leyes, los reglamentos, los decretos o acuerdos presidenciales y las normas oficiales mexicanas. Los marcos legales de los estados y los municipios, también se organizaron de manera similar, en el caso de los Estados, en la cima se encuentran las constituciones estatales (OCDE, 2000, p. 13). Desde esta perspectiva se tienen tres ámbitos de competencia: el federal, el estatal y el municipal.

En la actualidad son notables los contrastes existentes en el nivel de desarrollo de los tres ámbitos. El ámbito federal es el más desarrollado, y él que gestiona las actividades de mayor riesgo e impacto ambiental, tal es el caso de los jales en la minería. Por su parte, en el ámbito estatal y municipal, la legislación se encuentra menos desarrollada, a pesar de

que se regulan actividades menos complejas. Además, existen notables diferencias en los diferentes estados y municipios. Es cierto que la autonomía juega un papel importante, no obstante, el hecho de que no existan planes de desarrollo a largo plazo, independientes de los gobernantes en turno, limita en gran medida la concretización de diversos proyectos, incluyendo los ambientales. El hecho de que los municipios realicen las gestiones ambientales cotidianas, valida el cumplimiento de los objetivos ambientales, como es el caso de la recolección y disposición de residuos sólidos.

Una revisión general de la Constitución y las leyes ambientales de México muestra que éstas han sido edificadas sobre principios sólidos como el de prevención, el que contamina paga, el de precaución, entre otros. En una primera instancia, estos principios parecieran hacer más estrictas las regulaciones, sin embargo, en la práctica estos principios son irrelevantes. Aunque los legisladores concuerdan que la creación y la aplicación de las leyes son dos figuras distintas, ambas son parte de un mismo sistema, si la aplicación no es la correcta, la ley no puede lograr el cometido para el cual fue creada (Sousa et al., 2011, pp. 748–749).

A continuación, se realiza una breve descripción de las políticas ambientales: “comando y control” e “instrumentos de mercado” para entender las características de la legislación ambiental mexicana. Los enfoques convencionales conocidos como comando y control son regulaciones obligatorias poco flexibles que establecen estándares de emisión de contaminantes comunes para todas las empresas (Popp et al., 2010, p. 885).

In contrast, conventional approaches to regulating the environment are often referred to as “command-and-control” regulations, since they allow relatively little flexibility in the means of achieving goals. These regulations tend to force firms to take on similar magnitudes of the pollution-control burden, regardless of the cost. Command-and-control regulations do this by setting uniform standards for firms. The most commonly used types of command-and-control regulation are performance- and technology-based standards. A performance standard sets a uniform control target for firms (e.g., emissions per unit of output), while allowing some latitude in how this target is met. Technology-based standards specify the method, and sometimes the actual equipment, that firms must use to comply with a particular regulation (Popp et al., 2010, p. 885).

A diferencia de las políticas de comando y control, las políticas de mercado son disposiciones que imponen un costo a las empresas sobre la cantidad de contaminantes que vierten al ambiente. El gobierno ofrece incentivos financieros a las empresas para que

mejoren su desempeño ambiental de la manera que ellas prefieran (Stavins & Grumbly, 1993, p. 16). Un ejemplo de este tipo de políticas es el otorgamiento de permisos negociables que autorizan la emisión de determinadas cantidades de contaminantes. Las empresas pueden reducir sus emisiones y vender o alquilar las emisiones restantes a otras empresas (Stavins & Grumbly, 1993, p. 19). Si bien las empresas tienen la libertad de elegir si reducen sus emisiones, en el ámbito productivo esto tiene sus consecuencias, pues dentro de los sistemas de calidad se prefieren proveedores certificados en normas voluntarias como ISO 14001. Las cuales dentro de su estructura proponen la reducción de la contaminación.

En general, la legislación ambiental mexicana se caracteriza por ser prioritariamente de tipo de comando y control, donde las normas oficiales mexicanas fijan límites permisibles de emisión de contaminantes al ambiente. La NOM-001-SEMARNAT-1996, por ejemplo, establece los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF, 1997). La aplicación de cargos por contaminación e “impuestos verdes” es pobre en México, aunque existen ejemplos claros de su uso. En la regulación de externalidades negativas, por ejemplo, se tienen cargos económicos cuando se exceden los límites de descarga de contaminantes en las aguas residuales, establecidos en el permiso otorgado por la CNA. También existen cargos económicos si una empresa extrae más agua subterránea que la mencionada en la concesión otorgada. En lo que respecta a impuestos verdes, en el 2013 se introdujo un programa de reformas en diversas áreas incluyendo la tributaria. Las medidas de la Reforma Hacendaria del 2014 establecieron un impuesto fijo a los combustibles fósiles en función al contenido de carbono. Además, se introdujo un impuesto *ad valorem* sobre los plaguicidas, los herbicidas y los fungicidas para el 2015, con tasas entre 0 % y 9 %, dependiendo de la toxicidad del producto (OMC, 2017, pp. 8 y 22).

Las bases de la transformación de los marcos regulatorios se pueden encontrar en las políticas estructurales de los años ochenta y noventa. México estableció bases administrativas, legislativas y de política para enfrentar diversos problemas regulatorios, de los cuales, muchos aún persisten. A pesar de los esfuerzos realizados para descentralizar,

flexibilizar y transparentar el sistema, éste no ha dejado de ser complejo, legalista e inflexible (OCDE, 2000, p. 13). La complejidad de la legislación mexicana comienza desde que se pone en práctica el artículo 73 de la Constitución que estipula que el Congreso está facultado para “expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de las entidades federativas, de los Municipios y, en su caso, de las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico” art 73 fracción XXIX-G (DOF, 2019e, p. 72).

De manera explícita, cada ley que emana del Congreso Federal establece en los primeros artículos las facultades o competencias que se otorgan a la federación, a los estados y a los municipios para regular la materia señalada. De esta forma, las distintas actividades o rubros de una rama productiva determinada pueden ser regulados por la federación, los estados o los municipios. En el caso de la minería, por ejemplo, la mayoría de sus rubros son regulados por la federación, como el cambio de uso de suelo, el impacto ambiental o el análisis del riesgo, rubros menos significativos como el manejo de los residuos sólidos, o descargas al drenaje municipal, son regulados por el municipio.

Entonces, cada vez que se analiza una determinada rama productiva, es necesario indagar en la Constitución y en las leyes para determinar las instancias de gobierno que la regulan, siendo hasta cierto punto confuso. En caso de que se tenga duda sobre qué autoridad regula un rubro específico dentro de una rama industrial determinada el artículo 124 de la misma Constitución establece: “las facultades que no están expresamente concedidas por esta Constitución a los funcionarios federales, se entienden reservadas a los Estados o a la Ciudad de México, en los ámbitos de sus respectivas competencias” (DOF, 2019e, p. 142 art. 124).

El marco legal mexicano también se ha caracterizado por poseer una administración inflexible y rígida, más preocupada por documentar los procedimientos que por regular adecuadamente. El sistema se basa en el concepto de certeza jurídica que trata de redactar exhaustivamente los derechos y las obligaciones de los sujetos del derecho, así como los procedimientos que se deben seguir para imponer sanciones. La legislación debe señalar

expresamente las acciones que incurren en la ilegalidad y la forma como son castigadas, de lo contrario no existe delito que perseguir. Este concepto se diferencia del derecho común que puede poseer disposiciones implícitas no necesariamente escritas en el papel (OCDE, 2000, p. 14).

Las leyes y los reglamentos tienden a enumerar las obligaciones de los sujetos, más que a establecer los criterios sustantivos para tomar decisiones o evaluar resultados. El sistema se caracteriza por un nivel de detalle impresionante, pero al mismo tiempo, ante un sinnúmero de procedimientos aumenta la arbitrariedad de los actos administrativos (OCDE, 2000, p. 14). En la práctica, es notable la cantidad de información que se entrega a las autoridades en la COA. Se esperaría que ésta fuera parte de la base para guiar la política ambiental del país, o al menos para alimentar las estadísticas nacionales de manera más exhaustiva.

Las reformas regulatorias en México iniciaron con la creación de la Unidad de Desregulación Económica (1989), la promulgación de la LFMN (1992), de la Ley Federal de Competencia Económica (1992), de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo (LFPA) (1994), y del Acuerdo para la Desregulación de la Actividad Empresarial (1995), así como las posteriores reformas de la LFPA (1996) y la LFMN(1997) (OCDE, 2000, p. 19). La reforma de la LFMN ayudó a: i) facilitar la participación del sector privado en la elaboración, la certificación y la verificación de las normas, así como hacer más transparentes dichas actividades; ii) desregular la elaboración de normas, se sustituyó el análisis costo beneficio por la elaboración de la manifestación del impacto regulatorio (MIR); iii) fortalecer los procesos de inspección para verificar el cumplimiento de las NOM y su revisión; y iv) tratar de que se reconozcan los laboratorios de pruebas y de calibración, y los organismos de acreditación y de certificación en el extranjero, para establecer las bases que faciliten la celebración de acuerdos (OMC, 1997).

Gran parte de estas reformas a la LFMN permitieron que se creara un mercado ambiental o mejor dicho un mercado de bienes y servicios ambientales para apoyar la consolidación de la política ambiental de México. Los bienes y servicios ambientales se han ido desarrollando poco a poco, aunque su contribución económica es insignificante han

jugado roles importantes en la cuestión ambiental (Muñoz Villarreal, 2005, pp. 9 y 18). Uno de ellos es haber reducido los costos y las labores de inspección y prueba de las autoridades ambientales. Por ello, parte del trabajo de las autoridades es certificar a las empresas de servicios ambientales, donde pueden participar también las universidades (OCDE, 2000, p. 35). Dentro de los bienes y servicios ambientales se encuentran los laboratorios de calibración y pruebas, las unidades de verificación (agentes evaluadores) de la conformidad con las NOM, las unidades de verificación en materia de auditoría ambiental, las empresas de manejo de los residuos peligrosos, entre otros.³⁷

Si bien, estas acciones han promovido un mejor cumplimiento de la legislación, la realidad muestra que las pequeñas y medianas empresas, en este caso mineras de capital nacional, no cuentan con suficientes recursos para contratar estos servicios ambientales. Esto las hace menos competitivas y proclives al cierre de sus instalaciones y, con ello, se promueve la concentración y la centralización del capital. Además, mediante los mecanismos señalados, la legislación deposita en instituciones privadas el control ambiental.

Aunque la OCDE menciona que las reformas regulatorias han mejorado la constatación del cumplimiento legislativo (OCDE, 2000, p. 35), la realidad muestra que aún se tienen problemas. Uno de ellos es el acceso a la justicia ambiental, si bien existen procedimientos administrativos y penales para acceder a ella, en ocasiones las resoluciones dadas no son las más satisfactorias. Los mecanismos jurídicos para acceder a la solución de conflictos de naturaleza ambiental son complejos, tardados y, además, en muchas ocasiones dejan latentes los daños ambientales. Un ejemplo se encuentra en el derrame de 40 mil metros cúbicos de lixiviados de sulfato de cobre acidulado generado el 6 de agosto de 2014 por la Compañía Buenavista del Cobre subsidiaria de Grupo México en el arroyo Las Tinajas, afluente del Río Bacanuchi, el cual a su vez es afluente del Río Sonora. Para tener idea de lo dilatado que son este tipo de casos, basta con mencionar que a mediados

³⁷ Se entiende por evaluación de la conformidad, “la determinación del grado de cumplimiento con las normas oficiales mexicanas o la conformidad con las normas mexicanas, las normas internacionales u otras especificaciones, prescripciones o características. Comprende, entre otros, los procedimientos de muestreo, prueba, calibración, certificación y verificación” (DOF, 2018e, p. 2 art. 3).

del 2017, tres años después de ocurrida la tragedia, Ibarra Barreras y Moreno Vázquez daban constancia de que las acciones colectivas y los juicios de amparo emprendidas por la población afectada en contra de la Compañía Buenavista de Cobre aún permanecían sin una resolución definitiva (2017, p. 152).

La permanencia de esta empresa en operación y expansión, aún después de ocurrido el derrame es una muestra del poderío que tienen las grandes empresas mineras sobre los gobiernos de todos los niveles. Las sanciones más severas fueron la suspensión temporal de una parte de las operaciones de la empresa y una multa de 23 millones de pesos (Ibarra Barreras & Moreno Vázquez, 2017, p. 152). Al parecer, en la actual administración este caso será reabierto, para tratar de continuar el juicio contra la Compañía Buenavista del Cobre (Minería en línea, 2019b).

Si bien en México existen principios sólidos constitucionales para resarcir los daños ambientales, en la práctica estos no son aplicados por las autoridades competentes. Por citar un ejemplo, en este conflicto ambiental, el derecho a un medio ambiente sano establecido en el artículo 4 constitucional y su respectiva garantía correlativa: “el daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley” (DOF, 2019e, p. 10 art. 4), no fueron externados. No se presentaron demandas por responsabilidad ambiental, ni tampoco las mismas autoridades ambientales la hicieron presente, a pesar de estar vigente la Ley de Responsabilidad Ambiental. En su lugar, se optó por un mecanismo alternativo que dio origen al citado Fideicomiso Río Sonora (Ibarra Barreras & Moreno Vázquez, 2017, pp. 142–143). Cuyos compromisos aún permanecen inconclusos (2017, p. 152).

Las reformas regulatorias tampoco han mejorado la estructura laboral de las autoridades ambientales. Los funcionarios de niveles inferiores siguen llevando a cabo las visitas de inspección y, aunque muchos de ellos son profesionistas, no son especialistas en los procesos que revisan, aplican la ley sin interpretación alguna. Por otro lado, los cambios de altos funcionarios de un sexenio a otro también han llegado a constituir un problema, pues las políticas ambientales no son estables en el tiempo y, además, se olvida la aplicación institucional de las mismas (OCDE, 2000, p. 13).

En la actual administración (2018-2024) estos problemas se han acrecentado, la intención ha sido reestructurar a la SEMARNAT, sin embargo, esto aún no se ha cumplido. Dentro de las decisiones tomadas como parte de esta iniciativa de transformación y que dejan entrever que no existe un programa real de desarrollo se encuentran: i) el despido de todos los delegados estatales, no obstante, aún no ha habido contrataciones de nuevos funcionarios; ii) reducción de aproximadamente del 30 % del personal de confianza de las delegaciones estatales, esta acción ha desestabilizado la dirección ambiental del país, los 154 trámites relativos a la gestión ambiental se han visto obstaculizados; iii) reducción al mínimo de personal en las gerencias estatales de la Comisión Nacional Forestal; iv) Inestabilidad en la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental por una reestructuración inconclusa, esta subsecretaría es la más grande de la SEMARNAT y se encarga de todos los permisos, autorizaciones y actos de autoridad en materia ambiental; y v) desaparición de direcciones generales de SEMARNAT y creación de otras sin un sustento jurídico legal en un nuevo reglamento interior (Madrid Ramírez, 2020, pp. 7–8).

Si bien muchas de estas decisiones tienen su fundamento en acontecimientos desarrollados en las anteriores administraciones, existen muchos motivos por los cuales el país debe sustentar una política ambiental sólida. Siendo el más importante el aumento de la degradación ambiental a pesar de la existencia de un sinnúmero de regulaciones. El recuento de hechos en las administraciones ambientales pasadas, muestra que en México la política ambiental se ha convertido en una política sexenal, los programas sectoriales de medio ambiente son interrumpidos, lo que da lugar a un sistema legal proclive a la desestabilización y al aumento de actos impunes.

La política ambiental también se ha visto desequilibrada por la disminución constante del presupuesto de la SEMARNAT. El año más próspero en este sentido fue el 2015 con 67 977 millones de pesos y, el menos próspero, el 2019 con 31 020 millones de pesos; en cuatro años el presupuesto de la SEMARNAT disminuyó un 54 % (Madrid Ramírez, 2020, p. 7). Si bien un presupuesto más alto no significa que existe una mejor gestión ambiental, a primera vista se pudiera asumir que estas constantes reducciones sitúan a la

gestión ambiental como una actividad no prioritaria. No obstante, esto es motivo de un análisis más profundo.

Otro aspecto poco mencionado en la literatura es la corrupción que se ha generado en los distintos poderes que lideran la autoridad pública. En el caso del poder legislativo, la aprobación de las leyes ha dejado de ser un asunto del bien común para favorecer los intereses de las grandes corporaciones. Los miembros de este poder, muchas veces han aceptado sobornos ilegales en pro de la aprobación de ciertas iniciativas de ley. En el poder Ejecutivo, la situación es similar, Víctor Toledo, el nuevo secretario de la SEMARNAT, señaló en sus primeros discursos que la SEMARNAT estaba en manos de “esa minoría depredadora y rapaz que hoy destruye la naturaleza y el medio en buena parte del mundo. Me refiero a las grandes corporaciones” (La Jornada, 2019a). Esta situación no pudo darse sin la participación de los servidores públicos, quienes en ocasiones participan como facilitadores en los trámites ambientales a cambio de sumas de dinero.

En conclusión, a pesar de que el sistema legal mexicano ha emprendido reformas regulatorias desde 1989, es ampliamente reconocido por la OCDE y otras instituciones que la legislación mexicana es compleja y legalista, su gran nivel de detalle ha dificultado su aplicación. Además, es rígida, lo que ha impedido que el legislador actúe en base a principios filosóficos y éticos flexibles y, finalmente ha estado permeada por la corrupción. Estas características distancian el deber ser de la realidad. En los siguientes apartados se verá que la debilidad de las políticas ambientales no se limita a estas características, también es una legislación que se encuentra desfasada de los nuevos desarrollos tecnológicos, lo cual de alguna manera ha favorecido a los intereses económicos de las grandes empresas mineras.

5.2 La legislación ambiental y su aplicación en la minería

La regulación ambiental de la minería en México, como todas las ramas industriales tiene su fundamento legal en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos sobre la cual se ha desarrollado todo un conjunto de leyes, reglamentos y normas. Es una actividad regulada en su mayoría por la federación. No obstante, rubros como el manejo de residuos de manejo especial se encuentra regulado por los Estados, o el manejo de los residuos

sólidos por los Municipios. En los cuadros siguientes se presenta un esquema de las principales leyes, reglamentos y normas que regulan esta actividad.

Cuadro 30 Principales leyes y reglamentos ambientales de competencia federal aplicables a la minería

Instrumento legal (última actualización)	Principal elemento que regulan en la minería
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) (2018)	Aparte de las mencionadas en sus reglamentos, esta ley tiene por objeto promover: <ul style="list-style-type: none"> • Instrumentos económicos financieros como las fianzas o seguros ambientales • Normas oficiales mexicanas • La regulación de la exploración y la explotación de los recursos no renovables • La regulación de actividades altamente riesgosas • La prevención y control de la contaminación del subsuelo, suelo, agua y aire. • El control del ruido y las vibraciones • El derecho a la información • La participación social • Medidas de control y de seguridad y sanciones
<ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la LGEEPA en Materia de Ordenamiento Ecológico (2014) 	Regular los usos de suelo
<ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la LGEEPA en Materia de Impacto Ambiental (2014) 	Gestionar las manifestaciones de impacto ambiental y los informes preventivos
<ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la LGEEPA en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (2014) 	Proteger la calidad del aire
<ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la LGEEPA en Materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (2014) 	Gestionar el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
<ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la LGEEPA en Materia de Áreas Naturales Protegidas (2014) 	Proteger las áreas naturales protegidas
<ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la LGEEPA en Materia de Autorregulación y Auditorías Ambientales (2014) 	Gestionar la autorregulación y las auditorías ambientales
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (2018) <ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la Ley General Forestal Sustentable (2014)³⁸ 	Regular los cambios de uso de suelo
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (2018) <ul style="list-style-type: none"> • Reglamento de la LGPGIR (2014) 	Gestionar de manera integral los residuos para proteger al ambiente

³⁸ El reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable publicado en el 2018, aún no se promulga, por lo que se menciona el de la ley anterior.

Instrumento legal (última actualización)	Principal elemento que regulan en la minería
Ley de Aguas Nacionales (LAN) (2016) • Reglamento de la LAN (2014)	Regular la explotación, el uso, el aprovechamiento y la preservación del agua
Ley General de Vida Silvestre (2018) • Reglamento de la Ley General de Vida Silvestre (2014)	Regular la conservación y aprovechamiento de la vida silvestre
Ley de Responsabilidad Ambiental (2013)	Regular la responsabilidad ambiental por los daños ocasionados al ambiente
Ley General de Cambio Climático (2018) • Reglamento de la Ley General de Cambio Climático en Materia de Registro Nacional de Emisiones (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer regulaciones para mitigar los efectos adversos del cambio climático • Registro Nacional de Emisiones
Ley Federal de Derechos (2019)	Establecer los pagos por uso del agua y descargas de aguas residuales
• Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (2012)	Regular el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos
Ley de Armas de Fuego y Explosivos (2015) • Reglamento de la Ley de Armas de Fuego y Explosivos (1972)	Regular el uso de explosivos

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar del cuadro anterior, las principales directrices ambientales en la minería se encuentran contenidas en nueve leyes y trece reglamentos, de los cuales la LEGEPA por su carácter general es la que mayor número de temas ambientales desarrolla.

Cuadro 31 Principales normas oficiales mexicanas en materia ambiental aplicables a la minería

Norma Oficial Mexicana	Objeto de estudio	Fecha de publicación (última actualización)
NOM-001-SEMARNAT-1996	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	6-ene-1997
NOM-120-SEMARNAT-2011	Que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos.	13-mar-2012
NOM-141-SEMARNAT-2003,	Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales.	13-sep-2004
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.	2-mar-2007
NOM-155-SEMARNAT-2007	Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.	15-ene-2010
NOM-157-SEMARNAT-2009	Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.	30-ago-2011
NOM-159-SEMARNAT-2011	Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre.	13-feb-2012
NOM-043-SEMARNAT-1993	Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.	22-oct-1993
NOM-052-SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.	23-jun-2006
NOM-059-SEMARNAT-2001	Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo	30-dic-2010
NOM-133-SEMARNAT-2003	Protección ambiental-Bifenilos Policlorados (BPCs)-Especificaciones de manejo.	23-feb-2016
NOM-138-SEMARNAT-2012	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.	10-sep-2013

Norma Oficial Mexicana	Objeto de estudio	Fecha de publicación (última actualización)
NOM-085-SEMARNAT-2011	Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.	02-feb-2012
NOM-081-SEMARNAT-1994	Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.	03-12-2013

Fuente: elaboración propia.

Existen otras normas, que no se encuentran a cargo de las autoridades ambientales cuya importancia ha sido minimizada. Estas normas administradas por la Secretaría de Salud regulan la calidad del aire en los alrededores de las unidades mineras. En general, establecen las concentraciones máximas permisibles de ciertos contaminantes en el aire ambiente como una medida para proteger la salud humana. Uno de esos contaminantes son los polvos, que si bien pueden afectar la salud humana, también pueden transportar rápidamente metales y metaloides de naturaleza tóxica a distancias relativamente distantes, y facilitar que se distribuyan en los ecosistemas (Csavina et al., 2012, p. 58). Esta sería una razón por la cual deberían también formar parte de la legislación ambiental.

En general, estas normas no se encuentran desarrolladas en su totalidad, a parte de los contaminantes mencionados en el cuadro siguiente, no contemplan otros, como el arsénico o el cadmio. Metales altamente tóxicos con reducidos límites de exposición para el ser humano. De manera relevante, tampoco existe una norma de esta naturaleza que regule la concentración de cianuro en el aire ambiente; un aspecto de suma importancia cuando se habla de la lixiviación de miles de toneladas de mineral en el ambiente.

Cuadro 32 Normas oficiales mexicanas en materia ambiental aplicables a la minería, a cargo de autoridades de salud

Norma Oficial Mexicana	Objeto de estudio	Fecha de publicación
NOM-025-SSA1-2014	Salud ambiental. - Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación.	20-ago-2014
NOM-026-SSA1-1993	Salud ambiental. - Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.	23-dic-1994
NOM-021-SSA1-1993	Salud ambiental. - Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.	23-dic-1994
NOM-022-SSA1-1993	Salud ambiental. - Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre (SO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO ₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.	23-dic-1994

Fuente: elaboración propia.

A primera vista resulta inminente que existe un gran desarrollo de la legislación ambiental en México. De hecho, esta es la opinión de la mayoría de los consultores y funcionarios entrevistados. Empero, es importante mencionar que la legislación ambiental también facilita la apropiación desmedida de los recursos naturales, al menos en lo que a minería se refiere. El hecho de que las empresas mineras puedan adquirir superficies ilimitadas para explotar y procesar miles de toneladas de minerales por día, implica que diversos aspectos legislativos, también tendrán una naturaleza ilimitada, como los cambios de uso de suelo, los impactos y los riesgos ambientales, el consumo de agua, el ruido y las vibraciones, el uso de sustancias químicas, la generación de jales y otros residuos, y la emisión de sustancias químicas y de gases de efecto invernadero.

Dicho de otra manera, la legislación fue elaborada sin tomar en consideración el volumen de explotación de minerales. Es claro que, si una minera emite contaminantes dentro de los límites permisibles a través de varios puntos de emisión, es probable que los

habitantes de la región reciban tóxicos arriba de los umbrales permisibles para la salud, mientras se cumplen las normativas ambientales.

Ante el aumento de los diversos conflictos socioambientales, nueve de las compañías mineras más importantes a nivel mundial crearon la Iniciativa Minería Global (Global Mining Initiative, GMI), con el propósito de mejorar las relaciones sociales y la reputación de las empresas mineras. De esta iniciativa surgió el proyecto Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable, dirigido por el Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo (Saade, 2014, p. 9). Los resultados de este proyecto fueron presentados en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en Johannesburgo (2002), donde se creó el Foro Intergubernamental sobre Minería, Minerales, Metales y Desarrollo Sostenible auspiciado por Naciones Unidas para guiar las políticas del sector minero (Saade, 2014, p. 10). Después de la publicación del informe *Abriendo brecha: Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable*, países como Australia, Canadá, Chile, Colombia, Estados Unidos, Perú y México, comenzaron a desarrollar normas para proteger el ambiente en la minería (Saade, 2014, p. 34). De hecho, si se revisan las fechas de publicación de las normas oficiales mexicanas exclusivas de la minería en el cuadro 31, éstas datan de principios de siglo, a pesar de que el procesamiento de minerales por flotación y lixiviación en México, tiene más de cien años. Este es un ejemplo más de cómo la legislación minera en México se ha venido desarrollando como resultado de las presiones internacionales.

La pregunta que acontece en este contexto es ¿qué tan confiable es la legislación ambiental minera para proteger el ambiente y la salud humana?, en los apartados siguientes se realizará un análisis de mayor trascendencia para dar respuesta a esta pregunta. Sin embargo, una revisión rápida de la legislación anotada en los cuadros anteriores muestra un defecto alarmante: no existe una norma que dicte medidas específicas para el cierre de una mina. Si bien este tema es retomado en la evaluación del impacto ambiental y en la NOM-141-SEMARNAT-2003, la legislación ambiental no concentra en un sólo documento las disposiciones para el cierre de una mina. Tampoco existe una norma que regule los niveles de sismicidad por efecto de las detonaciones en una mina, un aspecto que pudiera ejercer serios problemas en las comunidades aledañas,

en las reservas ecológicas, en los cursos de agua, y en la fauna silvestre. Normalmente, las grandes empresas mineras recurren a la legislación de otros países para regular este aspecto.

La encuesta Fraser de 2019 situó a México, como el tercer país más atractivo para la minería en América Latina después de Chile y Perú; y el 29 a nivel mundial (Fraser Institute, 2019). El ranking minero mundial de Fraser establece el nivel de atracción minera para diversos países, considerando entre otros aspectos, sus regulaciones, sus impuestos, su potencial geológico, su estabilidad política y los aspectos sociales; pero teniendo como objetivo subyacente la evaluación costo-beneficio.³⁹ Este es un claro ejemplo de que las empresas transnacionales buscan naciones receptoras con políticas ambientales que les faciliten continuar acrecentando su capital.

5.3 La legislación ambiental y el manejo del agua en la minería

La legislación en materia de agua es de las pocas regulaciones que siempre ha estado presente desde el periodo presidencial de Porfirio Díaz. Con el tiempo, su complejidad ha sido cada vez mayor, pero también algunas de sus disposiciones han pasado a ser menos sustentables. La primera ley de agua del siglo XX data del 13 de diciembre de 1910 y, llevaba por nombre Ley de Aprovechamiento de Aguas de Jurisdicción Federal. Esta ley sólo regulaba el aprovechamiento de este vital líquido, no obstante, proponía una práctica sustentable que con el tiempo fue perdiéndose. Esta práctica establecida en los artículos 11 y 12, expresaba que la cantidad de agua concesionada debería equivaler a la superficie que se iba a regar.

Artículo 11.- Sólo podrán darse concesiones para riego mediante la justificación de que el solicitante es propietario de las tierras que hayan de regarse con la cantidad de agua pedida.

Artículo 12.- Cuando la concesión de aguas para riego se solicite por individuos ó compañías con el fin de suministrar agua mediante el pago de determinadas cuotas, la concesión podrá otorgarse teniendo en cuenta la superficie de las tierras que hayan de regarse, y cuyos dueños hubieren manifestado previamente su conformidad en que se otorgue la concesión (DOF, 1910).

³⁹ Las encuestas Fraser son desarrolladas por el Instituto Fraser, una organización canadiense independiente que realiza investigaciones sobre diversos temas, entre ellos el económico y el social.

La primera modificación de la legislación que conllevó una agresión al principio de sustentabilidad, ocurrió en 1992. Cuando la *Ley de Aguas Nacionales* (1992) (LAN) introdujo la posibilidad de transmitir los títulos de concesión o asignación de un espacio a otro. En otras palabras, los derechos de agua pasaron a ser mercancías. Con esta disposición legal, los dueños de las concesiones pueden negociarlas y distanciarse del uso de las mismas para crear un mercado de derechos de agua. Posteriormente, la reforma del 2004 de esta ley, agravó aún más esta situación al permitir no sólo transmisión total de los títulos de concesión sino también una parte de ellos. Esto condujo a que la administración de los títulos de concesiones se volviera más compleja. Hasta la fecha el artículo 33 en cuestión, menciona que:

Artículo 33. Los títulos de concesión para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, legalmente vigentes y asentados en el Registro Público de Derechos de Agua, así como los Permisos de Descarga, podrán transmitirse en forma definitiva total o parcial, con base en las disposiciones del presente Capítulo y aquellas adicionales que prevea la Ley y sus reglamentos (reforma del 8 de junio de 2012) (DOF, 2016a).

Estos hechos trajeron consecuencias no sustentables en lo que respecta al aprovechamiento del agua. La transmisión parcial o total de los derechos de agua para su uso o aprovechamiento, permite deslindar un título de concesión o una parte de éste de una porción definida de tierra. Bajo esta disposición, los derechos de agua tienen la posibilidad de transferirse de un espacio a otro dentro del mismo acuífero, lo que puede sobrecargar la extracción de agua en un espacio más que en otro. Anteriormente, se solicitaba que el lugar donde se fuera a perforar un pozo, debería ser propiedad de la persona dueña del título de concesión; ahora, éste puede establecerse en un terreno rentado por el tiempo que dure la concesión (CNA, 2019a). La Comisión Nacional del Agua tiene establecido que por cada hectárea agrícola para riego “a canto rodado” se requieren 6 000 m³ por año (CNA, 2019a).

Estos hechos son aprovechados por las empresas mineras y de otra índole, quienes compran derechos de agua a campesinos para cubrir sus necesidades y aumentar su producción. Además, estas empresas tienen la posibilidad de perforar pozos de agua en áreas con mayor factibilidad de agua independientemente si se encuentran fuera o dentro de su propiedad. El equilibrio establecido entre una concesión y una porción de tierra fue

subyugado por las grandes empresas mineras y por las mismas autoridades. Esta nueva modalidad de manejo de los títulos de concesión ha propiciado que el agua deje de ser vista como un bien común para pasar a ser una mercancía más del propio sistema.

Estas disposiciones de la LAN han propiciado conflictos entre las empresas mineras y las comunidades aledañas, a pesar de que la misma ley considera la posibilidad de negar la transmisión total o parcial de derechos de agua en caso de que se afecten los derechos de terceros o se modifiquen las condiciones hidrológicas de las cuencas o acuíferos (DOF, 2016a, p. art. 33). Uno de los últimos conflictos ocurrió entre la Minera Peñasquito ubicada en Mazapil y las comunidades aledañas. Los pobladores del lugar afirmaban que el manantial El Socavón se secó a raíz de la operación de esta empresa, al igual que los pozos con una profundidad de 120 a 150 m disminuyeron su nivel freático, por lo que exigen la reparación del daño ambiental (La Jornada, 2019b).

La Ley de Aguas de Propiedad Nacional (1929) daba cuenta de este tipo de sucesos, y suspendía simplemente las obras o aprovechamientos objeto de disputas si se afectaban aguas de propiedad nacional o privada.

Artículo 11.- El dueño de cualquier terreno podrá alumbrar y apropiarse libremente por medio de pozos, galerías, etc., las aguas que existan debajo de la superficie de su finca, con tal que no perjudique aprovechamientos existentes, ni distraiga o aparte aguas de propiedad nacional o privada de su corriente natural. Si con la ejecución y aprovechamiento de las obras de que antes se trata, se afectan aguas de propiedad nacional o privada, la Secretaría podrá suspender dichas obras o aprovechamientos (DOF, 1929).

Si bien las reformas de la LAN del 2004 y posteriores adicionaron nuevas disposiciones para preservar el equilibrio de los ecosistemas, en la en la práctica estas disposiciones no han permitido disminuir los conflictos, por el contrario, estos continúan aumentando.

Las personas físicas o morales, incluyendo las dependencias, organismos y entidades de los tres órdenes de gobierno, que exploten, usen o aprovechen aguas nacionales en cualquier uso o actividad, serán responsables en los términos de Ley de: a) Realizar las medidas necesarias para prevenir su contaminación y, en su caso, para reintegrar las aguas referidas en condiciones adecuadas, a fin de permitir su explotación, uso o aprovechamiento posterior, y b) Mantener el equilibrio de los ecosistemas vitales (DOF, 2016a, p. 76 art. 85).

A pesar de que se reformó el artículo 4 constitucional para establecer el derecho de todo ciudadano al agua, ciudades enteras tienen problemas para acceder a este vital

líquido. Aun así, el concesionamiento de agua subterránea no posee un límite en lo que respecta a la cantidad ni al tiempo. Basta con comprar derechos de agua o solicitarlos directamente a la CNA si no es una zona de veda. Las concesiones normalmente tienen una vigencia de diez años, pero se puede alargar indefinidamente si se renuevan antes de su fecha de vencimiento. Un mismo título de concesión puede abarcar los pozos que se requieran para cubrir el agua estipulada.

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines (DOF, 2012b, p. art. 4).

El sector agrícola ni el pecuario realizan pagos por el agua concesionada, excepto si se pasan del límite establecido. En el caso de los sectores industrial y de servicios, estos si realizan pagos por el uso o aprovechamiento del agua, dependiendo de la zona de disponibilidad donde se extraiga. Según la Ley Federal de Derechos (2018), existen cuatro zonas de disponibilidad, la primera tiene un costo de extracción de 16.9649 y 22.8597 pesos por m³ para aguas superficiales y subterráneas respectivamente; la segunda tiene un costo de 7.8102 y 8.8485, la tercera de 2.5609 y 3.0811, y la cuarta de 1.9582 y 2.2396 (DOF, 2018i, p. 161 art. 223). Así por ejemplo, la unidad minera La Herradura, una de las minas más prolíferas del país, perteneciente al municipio de Caborca, Sonora, se localiza en la cuenca Río Sonoyta 2, una zona catalogada con una disponibilidad de 1 (DOF, 2019b).

Uno de los problemas ambientales más comentados en los medios de comunicación ha sido la extracción desmedida de agua por la minería. Un elemento que se utiliza en diversas actividades, como en la barrenación de las rocas por equipos electrohidráulicos, en la molienda, en la flotación, en la lixiviación, en la supresión de polvos y en la elaboración de pasta. Este último elemento es una mezcla de jales y cemento, utilizada para rellenar explotaciones mineras subterráneas que ya no serán utilizadas, pero que permitirán la explotación de niveles adyacentes. La cantidad de agua que se utiliza por tonelada de mineral procesado es variable, no es la misma para un proceso de flotación que para uno de lixiviación, ni tampoco es la misma para los procesos de la misma índole. Se pueden

encontrar diferencias de una empresa minera a otra, en gran medida, esto se debe a la naturaleza de los minerales procesados. Por ejemplo, los minerales sulfurados con carbonatos requieren más agua que aquellos que no poseen carbonatos. También, los minerales con gran contenido de arcillas requieren mayor cantidad de agua, a menos que éstas se eliminen previamente. Por otro lado, los minerales que han sido molidos muy finamente para lograr una mayor liberación de los metales, también requieren mayor cantidad de agua.

Hay quienes cuantifican la cantidad total de agua utilizada por las empresas mineras sumando las cantidades especificadas en los títulos de concesión. No obstante, lo ideal es determinarla directamente a través del análisis de los procesos. Estadísticas mundiales indican que la minería produce más de 10 mil millones de toneladas de jales por año, los cuales se descargan en una solución que contiene entre el 30 y el 55 % de sólidos en peso, esto equivale a decir que se descargan alrededor de 7 000 giga litros de agua junto con los jales (Parker et al., 2016, p. 5). Por supuesto, parte de esta agua es recuperada por las empresas mineras, y reenviada a los procesos. La extracción de agua es uno de los impactos ambientales más significativos de la minería y, también, uno de los más costosos.

La cantidad de agua utilizada en las unidades mineras se vuelve significativa conforme aumentan las toneladas de mineral procesado. Así por ejemplo, Minera Peñasquito con una capacidad instalada para el tratamiento de 150 000 toneladas por día manifiesta extraer este vital líquido de varias comunidades aledañas como El Vergel, Rodeo, Tecolotes, Enrique Estrada y Matamoros (Minera Peñasquito, 2019). En el cuadro siguiente se presentan las concesiones de agua vigentes otorgadas a esta empresa según la versión pública de su COA 2017, como se observa, el agua total concesionada equivale a casi 50 millones de m³.

Sin embargo, si se analiza el anexo 5 donde se presentan las cantidades de agua subterránea extraídas por Minera Peñasquito en diferentes puntos de origen en el 2017, llama la atención que esta empresa utilizó menos de 18 millones de m³ de agua subterránea en este año (laborado en su totalidad). Una cantidad que equivale a 48 601 m³ de agua por día, la cual puede suplir el consumo per cápita del 57 % de la población de la ciudad de

Saltillo, una de las más cercanas a esta minera. Bajo este panorama surge la interrogante ¿Por qué Minera Peñasquito tiene concesionados casi 50 millones de m³ si utiliza menos de la mitad de estos?⁴⁰

Cuadro 33 Concesiones de agua otorgadas a Minera Peñasquito

Número de autorización por Comisión Nacional del Agua	Volumen anual (m ³)
07ZAC120195/36FMDL16	2 150 000
07ZAC100886/36FMDL09	450 000
07ZAC120326/36FMDL16	2 687 380
07ZAC120616/36FMDL16	1.68690466E7
07ZAC121303/36FMDL11	2 155 169
07ZAC121366/36FMDL17	5 927 820.2
07ZAC121550/36FMDL14	1 846 747
07ZAC154026/36FMDL16	8 201 217.2
07ZAC154052/37IMDL16	3 695 900
07ZAC155063/37FMDL16	6 000 000
Total, concesionado	49 983 280

Fuente: Minera Peñasquito (2018).

Durante una visita a las instalaciones de Minera Peñasquito, personal operativo comentó que utilizaba 2.2 m³ de agua por tonelada de mineral tratado como promedio de todos los procesos mineros desarrollados en sus instalaciones. De estos 2.2 m³, 1.7 m³ (77 %) se obtenían de los mismos procesos y 0.5 m³ (23 %) se adicionaban de alguna fuente (Minera Peñasquito, 2019). Personal entrevistado de la empresa Fresnillo plc mencionó que utilizaba 3.8 m³ de agua por tonelada de mineral procesado por flotación, de los cuales aproximadamente el 86 % procedía del mismo proceso y el resto se adicionada de fuentes externas. Por otro lado, la mina San José de Fortuna Silver Mines Inc. ubicada en Oaxaca mencionó en su reporte anual del 2018 que utilizó 2.7 m³ de agua por tonelada de mineral procesado, la cual se extrajo de pozos profundos, aunque no especificó la cantidad que recicló (Fortuna Silver Mines Inc., 2019, p. 45).

⁴⁰ De acuerdo con INEGI, la ciudad de Saltillo tiene una población de 807 537 habitantes (INEGI, 2015). El consumo per cápita de agua de la ciudad de Saltillo está valuado en 106 litros (INFONOR, 2016).

La compra de agua de agua municipal tratada o sin tratar es una fuente de suministro de agua de proceso para las empresas mineras que se encuentran cerca de ciudades. Esta opción disminuye los costos operativos de una empresa. Por ejemplo, Fresnillo plc estableció un convenio desde el 2008 con el Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Fresnillo (SIAPASF) para tomar 150 lps de agua residual municipal de la red de alcantarillado pública a cambio de otorgarle el mismo volumen de agua de laboreo. Una gestión donde también participó la CNA. Fresnillo plc lleva esta agua municipal a una planta de tratamiento operada por esta misma empresa, donde se mejora la calidad del agua para luego dirigirla a los procesos mineros de las minas de Fresnillo, Saucito y Juanicipio (Gómez Hernández, 2020).

En general, la materia orgánica total y los sólidos suspendidos totales son los principales componentes del agua residual municipal que pueden disminuir la eficiencia de los procesos de flotación. Sin embargo, estos contaminantes pueden eliminarse mediante algún tratamiento con carbón activado (Levay et al., 2001, p. 74). La procedencia del agua tratada municipal es importante, pues puede darse el caso de que ésta contenga un porcentaje significativo de descargas de tipo industrial con contaminantes de naturaleza desconocida que también pudieran interferir con la recuperación de minerales. Los municipios caracterizados como agropecuarios son mejores fuentes de agua residual para la minería que aquellos que poseen grandes instalaciones industriales.

En el caso de los municipios de Zacatecas, Guadalupe, Morelos y Vetagrande ubicados en el estado de Zacatecas, el agua municipal reciclada procede en su mayoría de descargas de tipo doméstico y, además, es tratada por lodos activados con aireación convencional, burbuja fina y flujo pistón (JIAPAZ, 2019a). Su principal destino es la agricultura, no obstante, también la compran empresas como Peñoles y Capstone Gold. El pago que realizan estas empresas a la Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Zacatecas (JIAPAZ) depende básicamente del equipamiento que se tenga en la planta de tratamiento que les suministra, y del tipo de convenio que se haya celebrado. En el caso de la mina de Capstone Gold ubicada en el Ejido de Hacienda Nueva, Morelos, la planta de tratamiento poniente ubicada en la comunidad Noria de los Gringos, le suministra

aproximadamente 25 lps (litros por segundo) equivalentes a 2 160 m³ por día, con un costo de 3.52 pesos por m³ más IVA. En el caso de la Minera Madero de Peñoles, la planta de El Orito, ubicada en el municipio de Zacatecas, le suministra alrededor de 55 lps, equivalentes a 4 752 m³ por día, con un costo de 3.92 pesos por m³ más IVA (JIAPAZ, 2019b).

Como se observa, los costos del agua municipal tratada son menores que los derechos de uso de agua en las zonas de disponibilidad 1 y 2, por lo que las empresas mineras han optado por la compra de este insumo cuando es química y geográficamente factible. El uso del agua municipal tratada disminuye los costos de procesamiento de los minerales y, propicia un aumento de los volúmenes de minerales tratados. La disponibilidad de agua municipal tratada disminuye la necesidad de extraer agua subterránea, lo que implica no invertir más en la compra de derechos de agua, en la perforación y el equipamiento de pozos, en el pago del uso del agua, así como en los costos de la energía eléctrica empleados en la extracción. Si bien es necesario transportar el agua tratada a la unidad minera, en muchas ocasiones la infraestructura empleada en esta acción es menos costosa que la extracción de agua subterránea.

La presencia de uno o más municipios en los alrededores de una mina, cuya política ambiental aterrice en el tratamiento de aguas residuales, dinamiza la explotación y la extracción de minerales. La posibilidad que tienen las empresas mineras de hacer uso del agua municipal depende, en gran medida, de la infraestructura de los municipios, aunque también existe la posibilidad de que las empresas mineras coparticipen en el tratamiento de este vital líquido. Tal es el caso de Minera Cuzcatlán que destina 120 mil dólares por año para tratar el agua del municipio con este mismo nombre, ubicado en Oaxaca. La cual, luego es utilizada por la misma empresa, y por el municipio.

La empresa firmó un contrato de comodato con el municipio para rehabilitar la planta hace 11 años, pues el gobierno local no tenía dinero para operar la planta. Esta tratadora procesa entre 600 y 900 metros cúbicos al día, con un costo promedio de un dólar por metro cúbico. De este monto, 60 % está relacionado con el costo de la electricidad (AIMMGM, 2019).

El agua de laboreo también puede suplir la demanda de agua de una mina, si ésta se encuentra en cantidad suficiente. No obstante, esta opción resulta ser más costosa debido a que se invierte no sólo en su extracción, sino también en los pagos que se realizan a la

CNA por su aprovechamiento. El agua de laboreo puede proceder de los escurrimientos de las partes superiores de la mina. En caso de que la empresa minera opte por no utilizar el agua de laboreo en el procesamiento de minerales, esta es sólo extraída para que no interfiera en las condiciones de operación de la mina, y enviada a un cuerpo de agua cercano. Puede darse el caso de que este cuerpo arrastre aguas residuales, con las que el agua de laboreo también se contamina y degrada.

Muchas investigaciones han reconocido que la calidad del agua utilizada en los procesos de flotación influye en la eficiencia de los mismos. Sin duda el agua con menos impurezas ayudará a recuperar más minerales metálicos. Usualmente, las fuentes de abastecimiento de agua (subterráneas o recicladas) contienen iones metálicos y material orgánico que pueden incidir en el proceso. En la medida en que las empresas mineras conozcan la calidad de sus suministros de agua y su influencia en los procesos, y los tratamientos que pudieran apoyar su reciclaje, estarán en vías de disminuir su huella hídrica.

Normalmente las empresas mineras reciclan el agua del proceso de flotación, después de que este líquido es utilizado se recupera de los tanques espesadores de sólidos y de las presas de jales, para luego, reenviarlo al proceso. El reciclaje del agua representa todo un desafío para la minería pues implica conocer en detalle las reacciones químicas que se desarrollan para concentrar los minerales y sus posibles interferencias. Este conocimiento es complejo, pues los minerales que ingresan a los procesos de beneficio no siempre son los mismos, en ocasiones se acompañan de minerales secundarios que pueden interferir en la recuperación. Por ejemplo, en el caso del beneficio del cobre, los sulfuros pueden acompañarse de carbonatos, bicarbonatos o óxidos, los cuales se pueden disolver en el agua de proceso y activar minerales que no se quieren recuperar en el momento, como es el caso de los minerales de zinc (Gutiérrez Pérez, 2019).

La tecnología no se ha hecho esperar en este ámbito, equipos como el espectrofotómetro Courier 6 SL realizan análisis elementales de la pulpa para identificar los minerales presentes en el momento y, con ello, controlar los tipos y cantidades de insumos que deben añadirse al proceso para lograr una mejor recuperación de los minerales de

interés (KUPDF, 2017).⁴¹ Esto también tiene influencia en el reciclaje del agua, pues si se conoce la calidad del agua que ingresa al proceso, los minerales presentes, y las reacciones químicas que se desarrollan durante su recuperación, se sabrá qué contaminantes se tienen que eliminar del agua para lograr una mejor recuperación de los minerales.

Si una empresa consume agua en su proceso industrial debe existir una salida de la misma. Si esta salida es una descarga de agua residual, ésta puede dirigirse a un cuerpo de agua nacional o al drenaje municipal. Las descargas a cuerpos nacionales son reguladas por la CNA, pero si éstas se realizan al drenaje, es el municipio quien las regula. Los permisos de descarga que otorga la CNA se fundamentan en la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Sin embargo, dependiendo del proceso, la CNA puede establecer condiciones particulares de descarga, las cuales siguen teniendo como fundamento dicha norma.⁴² Si las empresas rebasan los límites de emisión de contaminantes establecidos en los permisos de descarga, éstas son inspeccionadas y, a la par, deben realizar un pago por el exceso de contaminantes emitidos conforme a la Ley Federal de Derechos (CNA, 2019b).

Actualmente la NOM-001-SEMARNAT-1996 se encuentra en proceso de revisión, el 5 de enero de 2018 apareció en el DOF su proyecto de modificación (DOF, 2018a). Esta norma y su proyecto son normas generales para todas las industrias, no disciernen hacia donde se dirigen las descargas, lo mismo da que sea una zona de descarga, o de carga dentro del acuífero. Se tiene la creencia de que los procesos de dilución y asimilación de los contaminantes siempre van a ocurrir en los lugares de descarga.

En el caso de las empresas mineras, éstas manifiestan que no poseen permisos de descarga de sus procesos porque no desalojan aguas residuales a cuerpos nacionales. Puede

⁴¹ El término pulpa se utiliza para nombrar la mezcla de mineral con agua que ingresa al proceso de flotación.

⁴² "Condiciones Particulares de Descarga: El conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos y de sus niveles máximos permitidos en las descargas de agua residual, determinados por la CNA o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, para cada usuario, para un determinado uso o grupo de usuarios de un cuerpo receptor específico con el fin de conservar y controlar la calidad de las aguas conforme a la presente Ley y los reglamentos derivados de ella" (DOF, 2016a, p. 3 art. 3).

darse el caso que algunas empresas los tramiten, pero sólo para las aguas residuales procedentes de las áreas de servicios. Se considera que los procesos de flotación son “circuitos cerrados”, donde el agua de proceso se descarga al tanque espesador y a las presas de jales, para su posterior recuperación y reenvío al proceso. No obstante, se tiene que adicionar cierta cantidad de agua nueva al proceso para suplir las pérdidas por evaporación, infiltraciones y derrames. Si bien esta cantidad de agua en porcentaje es minoritaria, cuando se habla del beneficio de miles de toneladas de mineral puede llegar a ser significativa.

Si los procesos de beneficio fueran en realidad “circuitos cerrados” llegaría un punto en que el agua de proceso tendría que desalojarse o diluirse. Pues se acumularía una gran cantidad de contaminantes, los cuales pudieran interferir en la recuperación de los minerales, a menos de que exista un tratamiento fisicoquímico de por medio. El hecho de que se desalojen jales con agua al final del proceso y que un porcentaje de esta agua se pierda por evaporación, infiltraciones o derrames, implica que se tiene que adicionar agua nueva. Esta adición diluye los contaminantes presentes en el agua de proceso, lo que beneficia en gran medida la recuperación de los minerales. Pero también, esta adición evita que las empresas mineras inviertan grandes sumas de dinero en sistemas de recuperación y tratamiento de agua de proceso. A menos que estas inversiones disminuyan los costos de extracción de una onza de oro o de cualquier otro metal.

Tomando en consideración estos hallazgos, se puede establecer una relación interesante entre el manejo de los jales y del agua. La descarga conjunta de ambos elementos en las presas de jales tiene tres propósitos: i) diluir los contaminantes que pudieran interferir con la recuperación de los minerales dada la necesidad de adicionar agua nueva por pérdidas en evaporación, infiltración y derrames; ii) no invertir en tecnologías para el reciclaje total de este vital líquido, dado que existe la posibilidad de adicionar agua nueva; y iii) ahorrar recursos económicos en el manejo de jales, pues es más económico disponer jales con agua que jales secos o filtrados. Una técnica que se revisará con más detenimiento en el apartado 5.5.

Las descargas de aguas residuales procedentes de la flotación pueden llegar a contaminar cuerpos hídricos debido a su alto contenido de sólidos suspendidos, reactivos e iones de metales pesados. En la actualidad existen diversos tratamientos fisicoquímicos para reciclar el agua procedente de la flotación, como la coagulación y la floculación, la precipitación química, la electrocoagulación, la adsorción y la oxidación (Y. Li et al., 2019, p. 388). Si las autoridades ambientales exigieran el reciclaje total del agua de proceso, los tratamientos mencionados se utilizarían con mayor ímpetu, pero se incrementarían los costos del procesamiento de los minerales. Otra solución convencional para lidiar con los problemas de interferencias químicas durante el proceso de flotación es la racionalización de reactivos químicos en el proceso. Existen muchos ejemplos en la literatura de reactivos que se pueden adicionar al proceso de flotación para controlar determinados contaminantes, y mejorar la calidad del agua como la eliminación de iones de calcio y sulfato presentes en soluciones saturadas mediante el uso de compuestos de aluminato de calcio (Guerrero-Flores et al., 2018, p. 28).

En esta misma línea, existen equipos que pueden ayudar a recuperar una mayor cantidad de agua de proceso. La tecnología más efectiva y amigable con el medio ambiente, pero también la menos utilizada por sus altos costos es la filtración de jales (deshidratación de jales con filtros textiles). En la actualidad en México son pocas las empresas que han incursionado en esta nueva técnica, preferentemente la desarrollan empresas que no procesan muchas toneladas de mineral por día y que en su entorno el agua es muy escasa. Una de estas empresas es Minera Cuzcatlán Unidad San José ubicada en Oaxaca, quien procesa 3 000 toneladas de mineral por día. Esta técnica recupera el 95 % del agua de proceso, a diferencia del manejo de jales convencional utilizado con anterioridad que recuperaba hasta un 75 %. Esta empresa también reporta que los depósitos de jales filtrados ocupan 40 % menos de espacio que los jales tradicionales. Sin embargo, la filtración de jales es más costosa que el manejo de jales convencionales, cuesta 4.6 dólares por tonelada de mineral (filtración y depósito), una cantidad mayor a los 0.35 dólares que se pagan por manejar y disponer una tonelada de jales convencionales (González Pineda, 2020).

Por su parte, Fresnillo plc adquirió espesadores de alta compactación en las mineras de Fresnillo, Saucito y Juanicipio para recuperar una mayor cantidad de agua en su proceso. Una tecnología menos costosa, eficiente y amigable con el ambiente que la filtración de jales. Los espesadores de alta compactación descargan jales con 65 % de sólidos aproximadamente, lo cual permite reciclar el 85 % del agua de proceso. Estas descargas de jales con menos agua, dan mayor estabilidad a las presas de jales y disminuyen el porcentaje de accidentes. Asimismo, los espesadores de alta compactación ahorran un 30 % aproximadamente en reactivos (Gómez Hernández, 2020). Esta tecnología es adecuada para empresas que procesan grandes cantidades de mineral por día, sus costos son absorbidos por los ahorros que se generan en la disminución del consumo de agua. Incluso, esta tecnología combinada con el uso de agua municipal reduce aún más los costos de procesamiento de minerales, tal como ocurre en Fresnillo plc.

En conclusión, la regulación del uso del agua por la minería es uno de los grandes déficit de la legislación. En zonas semidesérticas, como ocurre en gran medida en México, este es un tema alarmante debido a la lenta recuperación de los acuíferos. De hecho, las quejas de las comunidades aledañas a las unidades mineras por la afectación de cuerpos de agua han aumentado durante la última década. Bajo este escenario no es ilógico pensar que uno de los atractivos para invertir en la minería mexicana tiene que ver con las ventajas que la legislación en materia de agua brinda a las empresas transnacionales.

Es notable que la cantidad de agua utilizada en la minería se vuelve significativa conforme aumentan las toneladas de mineral tratado. La legislación ambiental no ha regulado el consumo masivo de este recurso. El hecho de que cualquier empresa pueda adquirir derechos de agua ilimitados, da pie a que el reciclaje de este vital líquido no sea visto como uno de los principales temas a tratar, tampoco promueve que se adopten prácticas y tecnologías ya empleadas en otros países desarrollados. Existe la necesidad de que las empresas mineras conozcan a fondo las reacciones químicas que desarrollan en sus procesos de beneficio, para facilitar la recuperación de los metales y el reciclaje del agua.

5.4 La legislación ambiental y el manejo de las sustancias químicas en la minería

La minería es una de las actividades industriales que utiliza grandes cantidades de sustancias químicas en varios de sus procesos, como la explotación, la flotación y la lixiviación. En especial, la flotación es el proceso minero que mayor variedad de sustancias químicas utiliza. La innovación de este proceso comenzó hace más de un siglo, su desarrollo trajo consigo: i) un cambio radical en la forma como se flotan los minerales para su recuperación; ii) el aumento de una gran variedad de reactivos, los cuales han permitido el beneficio de una mayor diversidad de minerales; iii) el procesamiento de miles de toneladas de mineral; y iv) una disminución de la variabilidad del rendimiento y una mayor eficiencia de los procesos (Nagaraj & Farinato, 2016, p. 3).

A manera de repaso, la flotación es un proceso utilizado para separar los minerales de interés de otros de poco valor en el mercado. Esta separación se logra adicionando cierto tipo de sustancias químicas a la pulpa (mineral con agua), para que las partículas de mineral se vuelvan hidrófobas (no se asocien con el agua), y se adhieran a las burbujas de aire que circulan a través de las celdas de flotación. Luego, los minerales se concentran en la superficie de la solución procesada en una zona espumosa, a partir de la cual, por rebosamiento se recuperan los minerales.

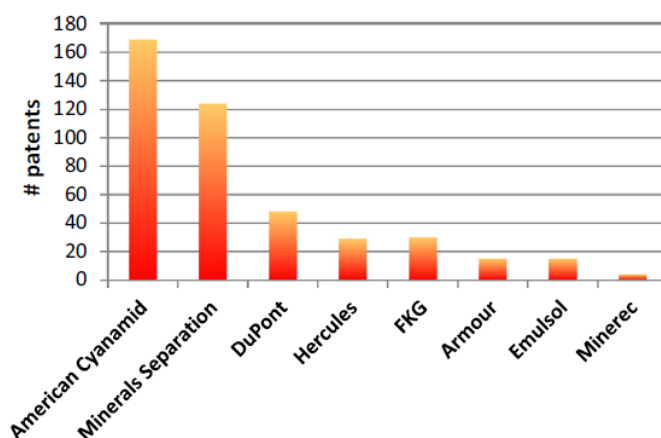
Desde la perspectiva histórica, se identifican cinco periodos en el desarrollo de los reactivos utilizados en el proceso de flotación. En el primer periodo (1860-1920), hubo una gran cantidad de innovaciones, las cuales: i) mejoraron los procesos ingenieriles para llevar a cabo la flotación y la recuperación de los minerales, un gran acierto en este sentido fue la introducción de las burbujas de aire; ii) eliminaron el consumo de aceites, los cuales eran utilizados como colectores de minerales.⁴³ Se descubrió que ciertos compuestos orgánicos pequeños y ligeramente solubles en agua, que incluían algunos agentes quelantes, eran más efectivos como colectores; iii) mejoraron la selectividad de los minerales mediante el uso

⁴³ Los colectores son sustancias químicas de tipo orgánico cuya función es hacer que la superficie de los minerales se vuelva hidrofóbica (que no le guste el agua de proceso), para permitir que estos se adhieran a las burbujas de aire y, sean posteriormente recuperados.

de productos químicos llamados modificadores.⁴⁴ Esto permitió recolectar los minerales de manera más limpia en los diferentes circuitos de flotación; iii) descubrieron que los medios alcalinos para flotar los minerales eran más eficientes que los medios ácidos, muy utilizados hasta entonces; y iv) redujeron el consumo de reactivos químicos, debido a su mejoramiento (Nagaraj & Farinato, 2016, pp. 3–4).

El segundo periodo (1921-1950) se caracterizó por el descubrimiento de una mayor variedad de sustancias químicas utilizadas en la flotación como los xantatos, y la expansión de las técnicas de flotación de minerales conocidas hasta la fecha.⁴⁵ Las sustancias químicas descubiertas para la flotación procedieron de la exploración de las investigaciones realizadas en otras ramas industriales como la construcción, la alimentación, petróleo, textiles, detergentes, los explosivos (Nagaraj & Farinato, 2016, p. 5). Varias empresas patentaron reactivos para flotación durante esta década, la más prolífera fue la estadounidense American Cyanamid con más de 160 patentes (Nagaraj & Farinato, 2016, p. 6).

Gráfica 17 Patentes de reactivos de flotación en el periodo 1921 - 1950



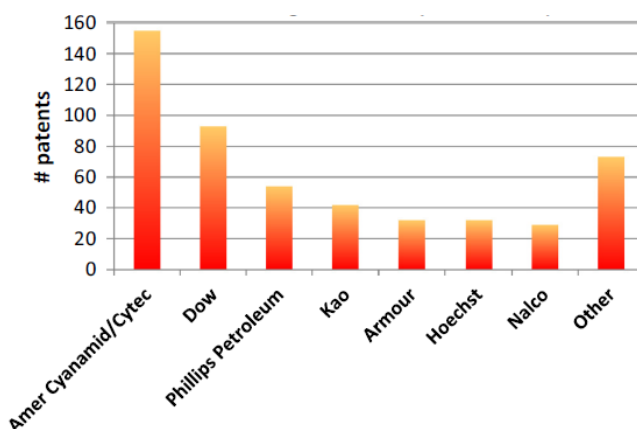
Fuente: Nagaraj & Farinato (2016, p. 7).

⁴⁴ Los modificadores son sustancias químicas que facilitan que ciertos reactivos se adsorban o no, sobre la superficie de los minerales.

⁴⁵ Los xantatos utilizados como colectores son sustancias químicas de tipo orgánico que proceden del disulfuro de carbono, un compuesto utilizado para fabricar el caucho.

En el tercer periodo (1951-2000), la investigación de sustancias químicas para la flotación dio un giro muy interesante, pasando de una fase exploratoria en otras ramas al diseño de reactivos específicos para separar uno o más minerales de interés. Esta etapa estuvo influenciada por grandes avances en el conocimiento de la química orgánica, de la química de polímeros y de la química de coordinación. La tendencia fue conocer la forma como los nuevos reactivos interaccionaban con los minerales a nivel molecular, para formular reactivos racionales. Este tipo de investigación se dirigió sobre todo al desarrollo de polímeros sintéticos, los cuales podían modificarse fácilmente mediante la adición de ciertos grupos químicos (Nagaraj & Farinato, 2016, p. 7).

Gráfica 18 Patentes de reactivos de flotación en el periodo 1921 - 1950



Fuente: Nagaraj & Farinato (2016, p. 8).

En el cuarto periodo (2000- al presente), a pesar de que se tenía una gran variedad de reactivos para la flotación, procedentes de las innovaciones de los años ochenta, no se tenían esquemas razonados para seleccionarlos y utilizarlos en los procesos a gran escala. Esto gestó una crisis para los fabricantes de sustancias químicas en los años noventa, debido a las pocas ventas de muchas de las tecnologías desarrolladas. Pero allanó el camino para el desarrollo de nuevas metodologías, para la selección y la aplicación de los reactivos, las cuales, han utilizado los softwares de última generación (Nagaraj & Farinato, 2016, p. 8). El objetivo primordial de este periodo ha sido la recuperación de grandes porcentajes de minerales, a través de tecnologías que hagan más eficiente el proceso, y disminuyan los costos de operación.

Este último periodo, se ha visto inmerso en un escenario donde la minería enfrenta grandes desafíos: i) el procesamiento de minerales con concentraciones de metales cada vez más bajas; ii) el procesamiento de minerales cada vez más complejos desde el punto de vista químico; iii) el uso del agua y la energía de manera más eficiente; iv) el manejo de los residuos de manera más eficiente; v) la disminución de los impactos ambientales; vi) el uso de productos químicos menos tóxicos; y vii) la garantía de la licencia social y ambiental, y el cumplimiento de las legislaciones (Nagaraj & Farinato, 2016, p. 9).

A pesar de que los gobiernos han dedicado tiempo y esfuerzo para evaluar la seguridad de las sustancias químicas utilizadas en diversos ámbitos existen cada vez más preguntas y lagunas sobre su comportamiento y efectos en el ambiente. A medida que las empresas se globalizan y se expanden por el mundo, los desafíos de una gestión adecuada de las sustancias químicas aumentan; el hecho de desconocer las características de cada una de las sustancias químicas que ingresan en el mercado es un indicador de que no existe una regulación apropiada (OCDE, 2001, p. 9). La cifra exacta de la cantidad de sustancias químicas que se manejan a nivel mundial es incierta. No obstante, hasta finales del 2015 existían 103 millones de sustancias químicas registradas en la Sociedad Americana de Química (CAS por sus siglas en inglés) (2015, p. 26).

A nivel internacional los esfuerzos por regular la gestión de las sustancias químicas se intensificaron desde la aprobación del Capítulo 19 de la Agenda 21 en la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo de Río de Janeiro (1992). Como parte de esta iniciativa, se desarrolló la Conferencia Internacional sobre Seguridad Química en Estocolmo (1994) y se creó el Foro Intergubernamental sobre Seguridad Química (IFCS por sus siglas en inglés), cuya tarea central ha sido implementar el Capítulo 19 de la Agenda 21. Derivado de los trabajos de este foro se creó el Programa Interinstitucional para la gestión racional de Productos Químicos (IOMC por sus siglas en inglés) (1995), para coordinar los trabajos de las organizaciones internacionales (Gärtner et al., 2003).

El Programa Inter-Organizaciones para la Gestión Racional de los Productos Químicos (IOMC) se estableció en 1995, siguiendo las recomendaciones hechas en 1992 por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, para reforzar la cooperación e incrementar la coordinación internacional en el campo de la seguridad

química. Las organizaciones participantes son la FAO, la OIT, el PNUMA, la ONUDI, el UNITAR, la OMS y la OCDE. El Banco Mundial y el PNUD son observadores. El propósito del IOMC es promover la coordinación de políticas y actividades perseguidas por las Organizaciones Participantes, conjunta o individualmente, para lograr la gestión racional de los productos químicos relacionados con la salud humana y el medio ambiente (IOMC, 2008, p. 2).

La Cumbre de Johannesburgo (2002) planteó el desarrollo del Enfoque Estratégico para el Manejo Adecuado de los Productos Químicos a Nivel Internacional (SAICM por sus siglas en inglés), el cual fue completado en la Primera Conferencia sobre el Manejo de Químicos realizada en Dubái, Emiratos Árabes (2006) (UNIDO, 2007). El SAICM es una iniciativa que responde a la necesidad de desarrollar una gestión efectiva de los productos químicos para cumplir con uno de los objetivos de esta Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible: “lograr que para 2020 los productos químicos se utilicen y produzcan siguiendo procedimientos científicos transparentes de evaluación de los riesgos y procedimientos científicos de gestión de los riesgos, teniendo en cuenta el principio de precaución enunciado en el principio 15 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo” (UN, 2002, p. 21). El IOMC es el principal mecanismo para guiar a los gobiernos nacionales para que cumplan con este objetivo. Las organizaciones participantes de este organismo ayudan a los países a desarrollar proyectos encaminados a fortalecer la gestión de los productos químicos (IOMC, 2008, p. 4).

Uno de los grandes problemas legislativos en la gestión de las sustancias químicas en México es que su regulación se encuentra disipada en varias secretarías, dentro de las que se encuentran: la Secretaría de Salud, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, la Secretaría de la Defensa Nacional y la SEMARNAT. La falta de coordinación entre estas secretarías no ha permitido crear una base de datos completa y actualizada de las sustancias químicas, a partir de la cual se pudieran tomar decisiones sólidas (Reforma, 2015). Esto ha conducido a que no se tenga un panorama real de las sustancias químicas que se manejan en México, existiendo vacíos informativos y regulatorios (INECC, 2014, p. 66). A la par, tampoco se ha podido cumplir con los objetivos del SAICM en este país (INECC, 2014, p. 100).

Hasta el año 2013 se tenían identificadas 9 489 sustancias químicas en el mercado mexicano, éstas fueron localizadas en la COA base 2009 – 2013, en los pedimentos de

importación del SAT y en el programa de auditorías ambientales de la Procuraduría Federal para la Protección del Ambiente (PROFEPA) (INECC, 2014, p. 100). La revisión de 14 instrumentos legislativos en el 2012 mostró que se tenían 2 199 sustancias químicas reguladas en este país (INECC, 2012, p. 44). En el cuadro siguiente se presentan las principales leyes que regulan las sustancias químicas en materia ambiental en las diferentes actividades industriales, incluyendo a la minería.

Cuadro 34 Principales leyes que regulan las sustancias químicas en México en materia ambiental

Instrumento jurídico:	Elemento que regula:
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y sus reglamentos	-Actividades altamente riesgosas -Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes -Normas oficiales mexicanas en materia ambiental -Prevención y control de la contaminación del subsuelo, suelo, agua y aire
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y su reglamento	-Manejo y disposición final de residuos peligrosos
Ley Federal de Armas de fuego y explosivos y su reglamento	-Explosivos
Ley de Cambio Climático y su reglamento	-Emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero -Registro Nacional de Emisiones
Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos	-Transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos

Fuente: elaboración propia.

El manejo de las sustancias químicas en México se encuentra regulado bajo el enfoque del análisis del riesgo. La LGEEPA en su artículo 147 exige a las empresas mineras el desarrollo de estudios de análisis de riesgo y programas para la prevención de accidentes, si desarrollan por lo menos una actividad altamente riesgosa.

Que el criterio adoptado para determinar cuáles actividades deben considerarse como altamente riesgosas, se fundamenta en que la acción o conjunto de acciones, ya sean de origen natural o antropogénico, estén asociadas con el manejo de sustancias con propiedades inflamables, explosivas, tóxicas, reactivas, radioactivas, corrosivas o biológicas, en cantidades tales que, en caso de producirse una liberación, sea por fuga o derrame de las misma o bien una explosión, ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población o a sus bienes (DOF, 1990a).

Dentro de la legislación no existe un reglamento específico para regular las actividades altamente riesgosas, sólo se cuenta con dos listados donde se mencionan las

sustancias químicas sujetas a regulación. El primero considera las sustancias de naturaleza tóxica (DOF, 1990a), en tanto que el segundo contempla las inflamables y las explosivas (DOF, 1992a); en total, estos dos listados regulan alrededor de 277 sustancias altamente riesgosas. En la práctica, las empresas que producen, procesan, transportan, almacenan, utilizan y disponen de las sustancias mencionadas en los listados, en cantidades iguales o superiores a las indicadas, tienen la obligación de elaborar un estudio de análisis de riesgo y un programa para la prevención de accidentes. En el caso de la minería, el cianuro de sodio mencionado en el primer listado (cantidad de reporte 1 kg), es la sustancia más común, por la que muchas empresas mineras desarrollan estudios de análisis de riesgo y programas para la prevención de accidentes.

El hecho de que sólo las sustancias contenidas en estos listados sean objeto de estudios de análisis de riesgo limita a las autoridades a solicitar que otras sustancias químicas de naturaleza desconocida sean evaluadas dentro de estos estudios. Esta regulación es muy elocuente con la lógica del enfoque de riesgo tradicional, que insta a no regular ninguna sustancia química a menos que en la práctica se demuestre que es peligrosa. Bajo este enfoque, las empresas pueden manejar un sin número de sustancias químicas sin restricción alguna, mientras no formen parte de estos listados.

Como se mencionó, en la minería, los procesos de flotación utilizan una gran variedad de sustancias químicas, las cuales varían de una mina a otra, porque los yacimientos no poseen las mismas características mineralógicas. Algunas de estas sustancias son conocidas por sus nombres químicos, otras se encuentran patentadas y sólo son nombradas por sus nombres comerciales, tal es el caso de los xantatos. Este último hecho, dificulta su identificación y la determinación de sus posibles riesgos en el entorno. Si bien es cierto que se adicionan pocas cantidades de reactivos por tonelada de mineral, la realidad muestra que el aumento de los volúmenes de minerales procesados trae consigo una mayor emisión de dichas sustancias al ambiente.

La dosificación de sustancias químicas se determina por medio de pruebas hidrometalúrgicas. En el cuadro siguiente se presenta un listado de las sustancias químicas adicionadas en un proceso típico de flotación de plomo, cobre y zinc. No se incluyen los

ácidos y los álcalis utilizados para regular el pH, pues estos reactivos se adicionan conforme los indicadores de pH lo sugieren. Como puede observarse, por cada tonelada de mineral procesado se adiciona más de un kilogramo de sustancias químicas.

Cuadro 35 Sustancias químicas adicionadas a un proceso de flotación selectiva de plomo, cobre y zinc

Etapa	Sustancia química	Cantidad adicionada por tonelada de mineral procesado
Círculo plomo-cobre: Celdas primarias para flotar el plomo y el cobre	Cianuro de sodio	10 g
	Sulfato de zinc	400 g
	Xantato	5 g
	Espumante	10 g
	Colector	10 g
Círculo plomo-cobre: Agotativo de plomo – cobre	Espumante	5 g
	Xantato	5 g
	Cianuro de sodio	5 g
	Floculante	8 g/t de concentrado
	Deshidratante	950 g/t de concentrado
Círculo de zinc: Celdas primarias para flotar el zinc	Sulfato de cobre	400 g
	Espumante	20 g
Círculo de zinc: Agotativo de zinc	Sulfato de cobre	200 g
	Espumante	10 g
	Xantato	5 g
	Floculante	8 g
	Floculante	8 g/t de concentrado
	Deshidratante	950 g/t de concentrado

Fuente: elaboración propia en base a entrevistas.⁴⁶

Una de las sustancias químicas empleadas en el proceso y, que han sido poco estudiadas son los xantatos. Estos compuestos son utilizados como colectores en el proceso de flotación, poseen una cadena de hidrocarburos y un grupo polar, al cual se unen los metales para volverse hidrófobos durante el proceso de flotación. En el mercado existe una gran gamma de xantatos, no obstante, son preferidos los xantatos de metales alcalinos de menor costo, como el etil xantato de sodio. Se ha demostrado que estas sustancias se bioacumulan en los seres vivos y, por sus propiedades forman complejos hidrófobos con los

⁴⁶ Es difícil conocer la naturaleza química de sustancias como los xantatos, espumantes y floculantes, los fabricantes no proporcionan su nombre químico en las hojas de datos de seguridad del material (HDSM).

metales pesados, por lo que también, facilitan que estos se bioacumulen. Los xantatos son altamente tóxicos para las algas acuáticas y las bacterias. El principal riesgo de estas sustancias para los organismos es que se hidroliza con los ácidos del estómago dando lugar a un alcohol y al disulfuro de carbono (CS₂).⁴⁷ Este último gas exhibe una toxicidad aguda de baja a moderada y se ha asociado a una serie de efectos a largo plazo como los neurológicos y los reproductivos. Tanto el disulfuro de carbono como el etil xantato de sodio se encuentran incluidos en la lista de sustancias peligrosas prioritarias de *National Occupational Health and Safety Commission* (NOSCH) en Australia (Bach et al., 2016, pp. 17–18).

Según la Ley de Productos Químicos Industriales (Notificación y Evaluación) (1989) de Australia “*a chemical may be declared a priority existing chemical if there are reasonable grounds for believing that the manufacture, handling, storage, use or disposal of an industrial chemical gives or may give rise to a risk of adverse health effects or adverse environmental effects*” (NICNAS, 1995, p. 1). El etil xantato de sodio fue denominado sustancia prioritaria debido a: i) la gran exposición laboral y ambiental a este químico, dadas las grandes cantidades que se utilizan en los procesos de flotación; ii) la falta de información sobre sus efectos en la salud y en el medio ambiente; y iii) la formación de disulfuro de carbono después de su descomposición, un gas con un potencial tóxico (NICNAS, 1995, p. 1).

En el caso de México, el etil xantato de sodio no se encuentra en los listados de actividades altamente riesgosas, por lo que no se pide un estudio de análisis de riesgo para esta sustancia. Sólo se encuentra el disulfuro de carbono derivado de la descomposición del etil xantato de sodio, pero para un manejo en estado líquido a partir de 100 kg, una actividad riesgosa que rara vez ocurrirá en la minería. Tampoco el etil xantato de sodio se encuentra en la NOM-010-STPS-2014, una norma laboral relativa a agentes químicos contaminantes del ambiente laboral, reconocimiento, evaluación y control; pero si el disulfuro de carbono.

⁴⁷ Hidrólisis de los xantatos en el estómago: $6C_2H_5OCS_2^- + 3H_2O \rightarrow 6C_2H_5OH + CO_3^{2-} + 3CS_2 + 2CS_3^{2-}$

Es muy probable que las descargas a las presas de jales contengan concentraciones pequeñas de xantatos y sus productos de la degradación, los cuales han sido poco estudiados. Los estudios de laboratorio indican que los xantatos en climas templados, se descomponen poco a poco a pH alcalinos y neutros, e instantáneamente en pH ácidos. Los productos de la degradación de los xantatos son tóxicos para los invertebrados acuáticos y un poco menos para los peces (Bach et al., 2016, p. 19). Por su puesto, los xantatos no son las únicas sustancias químicas utilizadas en los procesos de flotación, existen más, cuyos efectos y movilidad en el ambiente no son del todo conocidos. El hecho de que la legislación ambiental desconozca la toxicidad de muchas de estas sustancias no es evidencia para regularlas, este hecho contribuye a degradar aún más el ambiente.

Sin duda, otra de las sustancias químicas más controversiales que se utilizan en la minería es el cianuro de sodio. La capacidad de esta sustancia para solubilizar el oro y la plata fue reconocida desde 1783 por Scheele de Suecia, luego ésta fue estudiada por Elkington y Bagration de Rusia, Elsner de Alemania y Faraday de Inglaterra entre los años 1840 y 1850. De hecho, Elkington patentó las soluciones de cianuro de potasio para la galvanoplastia de oro y plata. Posteriormente Rae de Estados Unidos patentó en 1867 un proceso para lixiviar oro y plata con cianuro que nunca fue utilizado. El proceso que actualmente se emplea para lixiviar oro y plata fue patentado por MacArthur y los hermanos Forrest entre los años 1887 y 1888 (Marsden & Lain, 2006, p. 10).

El periodo 1972-2000 fue considerado él de mayor desarrollo tecnológico, en lo que a lixiviación de metales preciosos se refiere. La década de los años ochenta fue la más fructífera, en este tiempo se introdujeron diversas tecnologías dentro de las que se encuentran: el procesamiento del carbón en pulpa (CIP) y del carbón en lixiviación (CIL), la lixiviación en montones o pilas y en tanques, la electrodeposición y la reposición, la oxidación a presión de sulfuros, la oxidación biológica de concentrados y la cianuración intensiva (Marsden & Lain, 2006, p. 11).

El cianuro ha sido catalogado como uno de los elementos clave en la extracción del oro, es uno de los grandes avances tecnológicos acontecidos en la minería desde hace más de ciento veinte años (Angove, 2005, p. 97). No obstante, su toxicidad ha traído consigo

accidentes graves como el ocurrido en el año 2000, cuando la compañía minera Aurul derramó 100 000 m³ de solución cianurada al Río Sasar en Rumania cerca de la Bahía Mare, los cuales luego se depositaron en el río Danubio (Gibbons, 2005, pp. 182–183). Después de este accidente el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente (ICME) convocaron a un taller en mayo de 2000 donde participaron múltiples partes interesadas. El resultado de este evento fue el desarrollo del Código Internacional para el Manejo del Cianuro para la minería de metales preciosos (Gibbons, 2005, p. 183). Este estándar certificable tiene como propósito minimizar los riesgos para quienes entren en contacto con el cianuro, y también para el ambiente (Gibbons, 2005, p. 185).

El cianuro es una sustancia química utilizada no sólo en los procesos de lixiviación para disolver el oro y la plata, sino también en la flotación como depresor. Las cantidades de cianuro de sodio que se utilizan en los procesos son variables, dependen de las concentraciones de los metales en los minerales. Minera Peñasquito manifiesta utilizar de 600 a 850 ppm (mg/l) de cianuro de sodio en sus procesos de lixiviación, y 15 g/t de mineral en su procesos de flotación (Minera Peñasquito, 2019).

La lixiviación en pilas es uno de los métodos más utilizados para extraer metales preciosos de minerales con bajas leyes, fue desarrollado durante los sesentas y principios de los setentas por Heinen, Lindstrom y otros del *U.S. Bureau of Mines* en Nevada (Marsden & Lain, 2006, p. 13). La lixiviación en pilas consiste en colocar las rocas minerales trituradas en pilas o camas secuenciales, las cuales son previamente mezcladas con una sustancia alcalina, como la cal común. Cada pila es regada por goteo con una solución alcalina de cianuro de sodio durante algunas semanas para disolver los metales preciosos antes de colocar la siguiente pila. La solución obtenida rica en valores es procesada para obtener barras con contenidos de oro y de otros metales, comúnmente conocidas como barras doré. La solución libre de valores procedente de este último proceso es recirculada, pero antes se le adiciona nuevamente agua y cianuro de sodio. Los residuos minerales restantes permanecen en los patios en forma de montones, para luego ser remediados.

Figura 5 Fotografía de pilas de lixiviación



Fuente: propia, fotografía tomada en la Minera Real de Ángeles, proyecto “El Coronel”, el 17 de octubre de 2017.

El éxito del cianuro estriba en que forma un enlace fuerte con el oro (Au-CN) durante el proceso de lixiviación, si se quisiera sustituir esta sustancia por otra menos tóxica, ésta debería formar un enlace semejante con el oro (I) o el oro (III) (Ritchie et al., 2001, p. 427). En general, el cianuro es un reactivo muy eficiente para recuperar oro y otros metales de yacimientos con bajas leyes. El proceso que más lo utiliza es la lixiviación en pilas, un proceso barato y con pocos problemas operativos (Ritchie et al., 2001, p. 428); el cual se puede instalar más rápido que aquellos que requieren tanques y, con la tercera parte del capital de estos últimos. Este último aspecto es importante para las empresas mineras que deciden invertir en países políticamente inestables. La lixiviación en pilas ofrece también, una vía rápida para que las empresas pequeñas se capitalicen (Kappes, 2005, p. 459).

A pesar de sus bondades, el uso del cianuro de sodio presenta algunos problemas. El consumo de esta sustancia es mayor que la cantidad calculada estequiométricamente, esto se debe a que ciertos yacimientos contienen cobre, el cual también se asocia con el cianuro, lo que aumenta el consumo de este reactivo y dificulta la extracción posterior del oro. Además, la existencia de material carbonoso en los yacimientos puede absorber los complejos que forma el cianuro con el oro, con lo cual disminuye la eficiencia del proceso.

Finalmente, el oro atrapado en minerales refractarios como la arsenopirita, no es fácil de extraer a menos que se libere mediante alguna técnica intermedia, como moliendas más finas (Ritchie et al., 2001, p. 428).

A principios de siglo, se fabricaban aproximadamente 26 millones de toneladas de cianuro por año en el mundo. La minería utilizaba el 20 % de este reactivo, para lixiviar oro y plata, y como depresor en los procesos de flotación para separar los minerales con contenidos de cobre, plomo, molibdeno, zinc y otros metales (C. Young, 2001, pp. 101–102). Es muy probable que, en la actualidad, la producción de cianuro se haya incrementado, debido al aumento de la producción de oro durante el presente siglo.

Un indicativo de la cantidad de cianuro de sodio que se utiliza en México se encuentra en el análisis de los pedimentos o registros de importación de sustancias químicas del Servicio de Administración Tributaria (SAT) realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). El cuadro siguiente muestra que el cianuro de sodio fue la sustancia peligrosa con más registros de importación para los años 2010 y 2013. Más de la mitad de los registros de las sustancias tóxicas agudas que se importaron a México durante los años 2010 y 2013 pertenecieron al cianuro de sodio.

Cuadro 36 Registros de importación relacionados con sustancias químicas de los años 2010 y 2013

Año	Registros de sustancias químicas	Registros de sustancias químicas peligrosas	Registros de tóxicos agudos (venenos) y agentes infecciosos	Registros de cianuro de sodio (tóxico agudo)	Lugar que ocupa el cianuro de sodio en la lista de importación de sustancias químicas peligrosas
2010	1 296 399	26 452	3 069 registros (100 171 148 kg y 193 686 l)	1810	Primero
2013	1 608 801	23 312	3 371 registros	1902	Primero

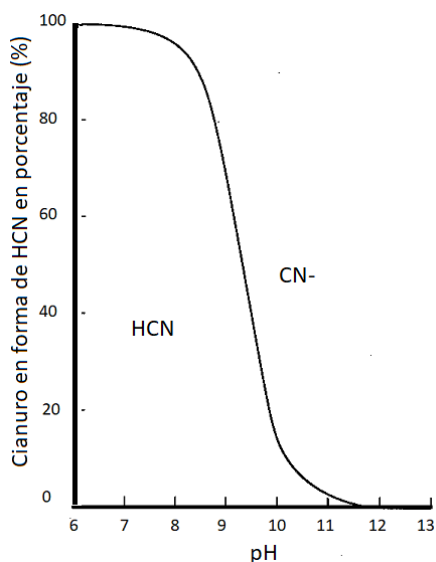
Fuente: elaboración propia con datos de INECC (2014, pp. 88–97).

Dadas las características tóxicas del cianuro se han probado lixiviantes alternativos a esta sustancia, muchos de los cuales han sido exitosos sólo a escalas piloto. Gran parte de los estudios se han realizado sobre el tiosulfato, la tiourea y los haluros, en especial este

primer reactivo es el más avanzado en investigaciones, y el más utilizado en la práctica. La mayoría de los procesos de lixiviación sin cianuro se encuentran en etapas tempranas de desarrollo (Aylmore, 2005, p. 501). El éxito de los lixiviantes alternativos al cianuro se ve disminuido debido a que los complejos que forman con el oro tienen constantes de estabilidad menores que las del cianuro. En el caso de este último reactivo, esta constante posee un valor de 38.3 para el complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, a un pH mayor a 9, en tanto que, para el tiosulfato, posee un valor de 28.7 para el complejo $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^-$, en un rango de pH de 8 a 10 (Aylmore, 2005, p. 502). En general, la lixiviación con tiosulfato desde el punto de vista químico es más compleja que la del cianuro. Para, que esta se lleve a cabo se requiere que el pH y el potencial de oxidación sean controlados cuidadosamente, al igual que las concentraciones de tiosulfato y de otros reactivos añadidos, como el amoníaco (oxidante), el cobre (catalizador) y el oxígeno (regenerante) (Aylmore, 2005, p. 505).

En el caso del cianuro, la lixiviación es más sencilla; se efectúa rociando las pilas de mineral con una solución alcalina de cianuro de sodio en presencia de oxígeno. En este caso, casi siempre el oxígeno atmosférico es suficiente, si la solución cianurada se airea antes de ser utilizada. El oxígeno atmosférico facilita que el oro se oxide a Au^{+1} , y forme un complejo con el ion cianuro (CN^-). La solución de cianuro de sodio se debe preservar entre un pH de 10 y 11, para conservar el ion de cianuro. Debajo de un pH 9, se genera una mayor cantidad de ácido cianhídrico, el cual no forma complejos con el oro, y es muy peligroso (Marsden & Lain, 2006, pp. 241 y 268). Controlar el pH en la lixiviación es relativamente barato si se utilizan sustancias alcalinas como el hidróxido de calcio, comúnmente conocido como cal. La gráfica siguiente muestra el porcentaje de ácido cianhídrico que se puede formar, de acuerdo con el pH de la solución en que se encuentra inmerso.

Gráfica 19 Especiación del ion cianuro (CN-) y el ácido cianhídrico (HCN) en relación al pH



Fuente: Marsden & Lain (2006, p. 235), traducción propia.

El cuadro siguiente califica de manera muy sencilla, las propiedades más relevantes de una serie de lixiviantes.

Cuadro 37 Propiedades relevantes de los lixiviantes más estudiados en el mundo

Lixivante	Estabilidad del complejo	Oxígeno como oxidante	Estabilidad química	Salud y seguridad	Efectos en el ambiente	Estado de desarrollo	Costo
Cianuro	+	+	0	-	-	+	+
Tiosulfato	0	-	-	+	+	0	+
Bisulfuro	+	0	-	0	0	-	+
Amoniaco	0	-	0	0	0	-	+
Cloruro	-	-	+	+	+	-	+
Tiourea	0	-	-	0	0	0	0
Tiocianato	+	-	+	-	-	0	0
Sulfuro	0	-	-	0	+	-	+
Bromuro	-	-	+	0	0	-	-
Yoduro	0	-	0	+	0	-	-

Fuente: Ritchie (2001, p. 438), traducción propia.

Las cualidades de los lixiviantes llevadas al ámbito económico y ambiental, dejan entrever conclusiones interesantes, en especial si se habla de los más estudiados: el cianuro y el tiosulfato. Primero, a pesar de que el cianuro no es el reactivo más barato es el más eficiente para lixiviar el oro. No obstante, sus costos pueden ser mitigados dado que se

utilizan concentraciones relativamente bajas y, no requiere de otros reactivos como el tiosulfato. Segundo, se pueden procesar miles de toneladas de minerales con concentraciones bajas de oro y de plata, de manera sencilla, a través de la lixiviación por pilas. Basta con rociar los minerales triturados con cianuro de sodio a un pH entre 10 y 11, no se requieren tanques especializados, a menos que se opte por la lixiviación dinámica. La lixiviación en pilas es uno de los métodos más económicos que existen, y uno de los más nocivos para el ambiente, pues las reacciones químicas se llevan a cabo en la intemperie para facilitar que el ácido cianhídrico que se pudiese llegar a formar se disipe en el ambiente y no afecte a los trabajadores. En el caso de la lixiviación por tiosulfato es difícil tratar miles de toneladas de mineral en pilas secuenciales, dada la complejidad de las reacciones químicas. Más bien este tipo de lixiviación se realiza en tanques especializados, donde es factible controlar las variables involucradas en el proceso.

Tercero, la lixiviación con cianuro es un proceso relativamente fácil de operar, el amplio rango de pH en el cual se desarrolla permite que cualquier obrero capacitado participe en la conducción del proceso, no se requiere la presencia de profesionistas especializados si el proceso se encuentra estabilizado. Cuarto, para que la lixiviación con cianuro tenga éxito es necesario que a nivel molecular exista contacto entre los metales preciosos y el cianuro, para que estos puedan ser disueltos. Existen minerales que necesitan ser pretratados para que ocurra este contacto, tales es el caso de los refractarios. Actualmente, se han encontrado minerales de mayor complejidad, como es el caso de los telururos (oro asociado al telurio), que para ser lixiviados requieren de técnicas más sofisticadas y más costosas que las utilizadas para los minerales comunes. Por el momento, las empresas mineras prefieren no explotar este tipo de yacimientos, ya que no son tan redituables, y sus ganancias pueden verse disminuidas.

Recientemente, en los yacimientos existentes en México se ha detectado la presencia de especies de oro y/o plata asociados al telurio; éstas no pueden ser procesadas por el método normal de extracción y provocan una disminución en la recuperación de metales preciosos. En el estado de Sonora se produce la mayor cantidad de oro en México y se han detectado alrededor de 30 especies de telurio. Los yacimientos con telururos de oro o plata son difíciles de procesar por el método de cianuración, y existe una controversia en cuanto a la causa real de la dificultad de lixiviación (extracción de uno o varios solutos de un sólido, mediante un disolvente líquido) con cianuro. Hoy en día dichas especies se consideran minerales no

recuperables (o refractarios a la cianuración) y no se están procesando, lo que ocasiona pérdidas cada vez mayores para las compañías mineras (Nava, 2018, p. 23).

Sin duda alguna, el cianuro ha sido una revolución tecnológica dentro de la minería, su uso como lixiviante universal ha facilitado que las empresas procesen miles de toneladas de minerales con concentraciones de metales preciosos bajas a costos relativamente bajos, con lo cual han incrementado sus ganancias, pero a la vez han propiciado una mayor degradación del ambiente. Mientras existan yacimientos de oro y plata procesables con cianuro y técnicas relativamente sencillas, y la legislación no restrinja el uso de este reactivo, las empresas seguirán extrayendo metales preciosos por esta vía.

A pesar de que la lixiviación con cianuro es una actividad que data en México desde principios del siglo pasado, su legislación es de reciente creación. La NOM-155-SEMARNAT-2007, promulgada el 15 de enero de 2010, establece una serie de medidas para prevenir los efectos indeseables de la lixiviación de oro y plata con cianuro, que van desde la caracterización del sitio donde se establecerá el proceso, hasta el cierre y el monitoreo del lugar. Esta norma no insta a las empresas a utilizar lixiviantes menos tóxicos. El simple hecho de que el cianuro sea el lixiviante por elección, posibilita la lixiviación de miles de toneladas de mineral y, consecuentemente, implica cambiar el uso del suelo de grandes superficies, consumir grandes cantidades de agua, emitir grandes cantidades de polvos y sustancias químicas, entre otras cuestiones. Indudablemente esta norma apoya a las empresas mineras para que obtengan mayores ganancias, pues la lixiviación en pilas, es uno de los métodos extractivos más económicos.

Durante la fase lixiviación, el ion cianuro (CN^-) interacciona con los minerales para formar compuestos y complejos con muchos elementos. Algunas especies químicas de cianuro son más tóxicas que otras, estando en la cima el ácido cianhídrico HCN (Smith & Struhsacker, 2007, p. 275).⁴⁸ El tratamiento que se les dé a éstas especies de cianuro después de terminada la lixiviación determinará hasta qué punto las pilas dejarán de representar un riesgo para el ambiente (Johnson, 2015, p. 194). El cuadro siguiente muestra

⁴⁸ Se utiliza la palabra “especie química”, para designar de manera genérica: átomos, compuestos, complejos, iones, radicales, etcétera.

una clasificación general de las especies de cianuro y las especies relacionadas con el cianuro que pueden ser encontradas en las pilas de lixiviación. Los complejos de cianuro se clasifican como: i) complejos débiles de cianuro (WAD), los cuales son relativamente inestables, y se forman con el cianuro y los metales de transición, incluyendo al cadmio, cobre, níquel y zinc; y ii) complejos fuertes de cianuro (SAD), los cuales se disocian sólo bajo condiciones ácidas extremas, y se forman con el cianuro y metales como el fierro, el cobalto, la plata y el oro (Zagury et al., 2004, p. 212).

Cuadro 38 Toxicidad de las especies de cianuro y las especies relacionadas con el cianuro que pueden ser encontradas en las pilas de lixiviación

Grupo	Especies	Toxicidad ^a
Cianuro libre	CN ⁻ HCN aq	Alta
Complejos débiles de cianuro	Zn(CN) ₄ ⁻² Ag(CN) ₂ ⁻ Cd(CN) ₄ ⁻² Ni(CN) ₄ ⁻² Cu(CN) ₃ ⁻² Cr(CN) ₆ ⁻³ ^b Mn(CN) ₆ ⁻³	Intermedia
Complejos fuertes de cianuro	Fe(CN) ₆ ⁻³ ^b Fe(CN) ₆ ⁻⁴ ^b Co(CN) ₆ ⁻⁴ ^b Au(CN) ₂ ⁻ Complejos del grupo del Pt	Baja
Especies relacionadas con el cianuro	CON ⁻ SCN ⁻ C ₂ N ₂ ^c CNCl ^c	Baja Baja Alta Alta
a .- Toxicidad mencionada por Boening & Chew (1999), Bhunia <i>et al.</i> (2000), y Gensemer <i>et al.</i> (2006) b .- Sujetos a foto disociación c .- Su presencia en soluciones lixiviantes es incierta		

Fuente: elaborada con base a (Johnson, 2015, p. 196), traducción propia.

En los ecosistemas existen ciertas especies de bacterias, fungi, algas, levaduras y plantas que pueden oxidar el cianuro naturalmente.⁴⁹ Este mecanismo de degradación convierte el cianuro en cianato (OCN⁻), una especie menos tóxica (C. A. Young & Jordan, 1995, p. 110). No obstante, en la minería, la gran cantidad de cianuro que se emite al

⁴⁹ Reacción de biooxidación del cianuro: CN⁻ + ½O₂(aq) → OCN⁻ (C. A. Young & Jordan, 1995, p. 110).

ambiente supera por mucho la labor de estos organismos. Por lo que las empresas mineras recurren a métodos de destrucción y recuperación del cianuro para minimizar los impactos ambientales de esta sustancia. En México, es más común destruirlo que recuperarlo.

Se trata de destruir el cianuro en las pilas que quedan después de ocurrido el proceso de lixiviación, para proteger a la fauna silvestre. También, se trata de destruir el cianuro de las soluciones de proceso que serán desechadas (Botz et al., 2005, p. 673). Dentro de los métodos más populares que se utilizan para destruir el cianuro se encuentra la adición de oxidantes, los cuales tienen una gran afinidad por electrones del cianuro y, generan como subproducto el cianato. Los oxidantes más populares son el oxígeno, el ozono, el peróxido de hidrógeno, el cloro, el hipoclorito, y el dióxido de sulfuro (C. A. Young & Jordan, 1995, p. 112).

De acuerdo con la NOM-155-SEMARNAT-2007, una vez que termina el proceso de lixiviación se deben lavar las pilas para destruir el cianuro hasta que los WAD en el efluente del agua de lavado tengan un valor de 0.2 mg/l, y se tenga un pH entre 5 y 10 (DOF, 2010, p. 23 inciso 5.8.1). La norma sólo habla de los WAD al igual que muchas otras legislaciones, pues se cree que se incluyen los compuestos de cianuro de mayor impacto en el ambiente. En ningún momento se habla de regular los SAD de iones como el fierro, el cobalto, el molibdeno, el tungsteno, el renio, o elementos del grupo de platino. Se piensa que son inertes, debido a que se disocian poco y, por lo tanto, liberan poco cianuro. Se consideran que no se encuentran disponibles y, que sus impactos ambientales son insignificantes. No obstante, se ha encontrado evidencia que estos complejos juegan un rol importante durante las fases de lixiviación y de remediación de las pilas (Johnson et al., 2001, p. 35). Cuando las pilas se encuentran en operación, los SAD se forman y se adsorben en los minerales o en la materia orgánica del suelo. Cuando las pilas son lavadas para su remediación, los WAD en los efluentes del lavado, decrecen en cantidad conforme pasa el tiempo (Johnson et al., 2001, p. 47). En el caso de los SAD, estos se pueden seguir liberando por muchos años, y llegar a contaminar cuerpos de agua. Además, pueden generar cianuro libre (la especie química más tóxica) si se exponen a la radiación solar (Johnson, 2015, p. 203).

Este contexto manifiesta la importancia de regular no sólo los WAD, sino también los SAD. Si bien estos últimos son menos tóxicos que los primeros, no dejan de ser una amenaza al ambiente. Sobre todo cuando se utilizan métodos de destrucción del cianuro que no destruyen los SAD, como es el caso del hipoclorito de sodio o el peróxido de hidrógeno (agua oxigenada) (C. A. Young & Jordan, 1995, p. 113). De hecho, el hipoclorito de sodio es el reactivo más utilizado para destruir el cianuro en México, las empresas mineras lo prefieren por su rapidez y sus bajos costos, en especial aquellas que lixivian miles de toneladas de minerales con bajas concentraciones de oro y plata. Sin embargo, como se mencionó, no destruye los SAD, estos permanecen almacenados en las pilas con la posibilidad de ser foto disociados en cianuro libre.

En resumen, el análisis anterior muestra al menos tres preocupaciones respecto de la legislación ambiental en el manejo de los químicos en la minería. Existen legislaciones más avanzadas en otros países cuyas regulaciones no son contempladas en México, pese a que los procesos mineros guardan perspectivas semejantes. La legislación no busca presionar hacia cambios tecnológicos menos contaminantes, sino sólo regular los procesos que las empresas mineras desarrollan. Finalmente, la legislación evita regular muchos procesos que son comprobadamente tóxicos, reduciendo su acción en algunos de los más evidentes, con lo cual la degradación ambiental continua en aumento.

5.5 La legislación ambiental y el manejo de los jales en la minería

El manejo inadecuado de los jales ha causado daños ambientales, y problemas de seguridad por el colapso de las presas o depósitos de estos residuos a lo largo de la historia de la minería. Estas estructuras son una de las responsabilidades más significativas asociadas con una mina. Si bien la publicación de la Ley de Responsabilidad Ambiental (2013) obliga a las personas físicas o morales a reparar o compensar el daño que hayan ocasionado (DOF, 2013b, p. 4 art. 10); aún queda mucho por hacer en lo que al manejo de jales concierne, como se verá en los párrafos siguientes.

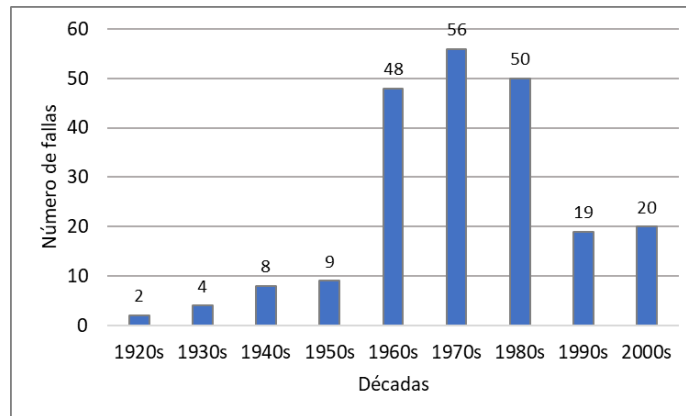
Después que se recuperan los minerales de interés en el proceso de flotación, los residuos restantes llamados jales son depositados en una obra de ingeniería, cuya

construcción se realiza a la par que se depositan estos materiales. Las presas de jales son una de las estructuras más grandes erigidas por los ingenieros geotécnicos. Dado que son construidas en su mayor parte con la fracción gruesa de los jales, para ahorrar costos, mantenerlas en pie es una de las tareas más desafiantes para la minería (Azam & Li, 2010, p. 50). Se supone que estas estructuras se mantendrán intactas por largos periodos, sin embargo, la experiencia ha demostrado que los derrames que se presentan durante su operación son una amenaza real para las poblaciones aledañas. A diferencia de las presas de agua, las presas de jales son más susceptibles a accidentes debido a que: i) los terraplenes se construyen con materiales residuales de las operaciones mineras; ii) las presas de jales crecen secuencialmente conforme van aumentando los jales inmersos en agua; iii) las regulaciones son insuficientes para asegurar la estabilidad de las presas; y iv) el mantenimiento es costoso después del cierre de las operaciones (Rico et al., 2008, p. 846).

Ante la falta de una base de datos mundial de los accidentes de presas de jales, Azam & Li reunieron las bases de datos de varios organismos, para analizar estadísticamente los eventos disponibles. Dentro de éstas se encontraban las bases de datos de la Comisión de Grandes Presas de Estados Unidos (USCOLD por sus siglas en inglés) y de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés). En primera instancia los eventos fueron divididos en aquellos ocurridos antes del 2000 (198 eventos) y los suscitados desde este año (20 eventos) (Azam & Li, 2010, p. 50).

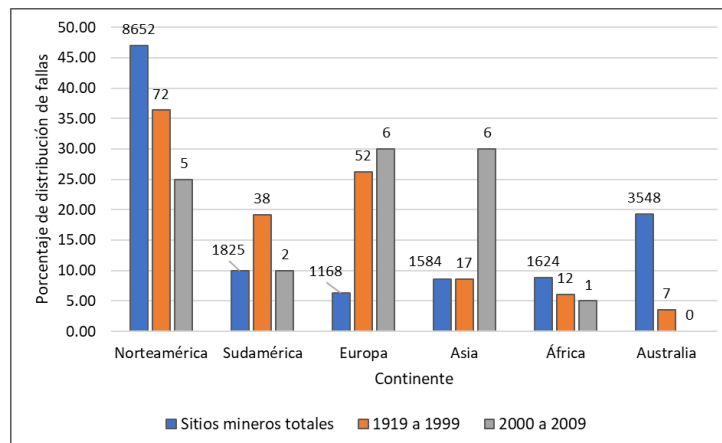
La gráfica siguiente muestra la distribución de las fallas de las presas de jales a través del tiempo. Como puede observarse, en los sesenta, setenta y ochenta se tuvieron aproximadamente 50 eventos por década. Este hecho se atribuye a que en este periodo se reconstruyó Europa y se desarrollaron nuevos países independientes. La gráfica subsiguiente muestra la distribución de fallas por regiones. De los 198 casos antes del 2000, la mayoría de los eventos ocurrieron en Norteamérica (36 %), seguidos por Europa (26 %) y Sudamérica (19 %). Los casos posteriores al 2000, ocurrieron principalmente en Europa y Asia (60 %) (Azam & Li, 2010, p. 51).

Gráfica 20 Accidentes de presas de jales



Fuente: Azam & Li (2010, p. 50), traducción propia.

Gráfica 21 Distribución de accidentes de presas de jales por región

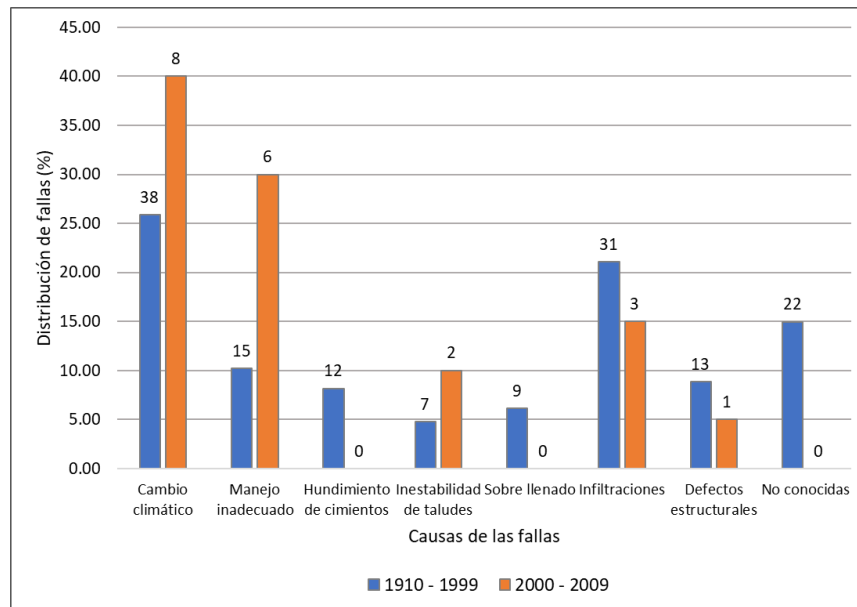


Fuente: Azam & Li (2010, p. 51), traducción propia.

La gráfica siguiente muestra la distribución de las fallas en las presas de jales por causa, como se observa, las fallas debido a condiciones climáticas inusuales aumentaron de un 25 % antes del 2000, a un 40 % después del 2000. Esto sugiere que los diseños de las presas de jales deben prestar mayor atención a las nuevas condiciones climáticas, se requiere la valoración de nuevos parámetros meteorológicos para su construcción. Las fallas debido a un manejo inadecuado de las presas aumentaron de un 10 % antes del 2000, a un 30 % después del 2000. Si bien esta última causa puede asociarse a diversos factores como la falta de mantenimiento y el aumento de las tasas de explotación y beneficio

durante el presente siglo, es la segunda que mayor presión ha causado en las presas de jales (Azam & Li, 2010, p. 51). Estos datos también dejan entrever que ha habido aprendizajes interesantes, como es el caso del comportamiento de la licuefacción sísmica (hundimiento de cimientos), cuyas fallas descendieron de un 8 % antes del 2000, a un 0 % después del 2000 (Azam & Li, 2010, p. 52).

Gráfica 22 Distribución de fallas de presas de jales por causa



Fuente: Azam & Li (2010, p. 51), traducción propia.

El cambio climático puede causar estragos, no sólo sobre las estructuras de las presas, sino también sobre los mismos jales. El incremento de la temperatura y de la precipitación puede aumentar las tasas de oxidación de los sulfuros metálicos, y de generación de drenaje ácido. También las capas de tierra y de recubrimiento vegetal utilizadas en la remediación de las presas de jales pueden agrietarse o degradarse, debido a las repetidas acciones de expansión y contracción, causadas por las severas condiciones climáticas (secas y húmedas). Esto contribuye también a aumentar la oxidación de los sulfuros y la generación de drenaje ácido, debido a la entrada de aire y agua (Phillips, 2016, p. 98).

Los jales son partículas de minerales finamente molidas que salen del proceso de flotación, con contenidos de agua mayores al 50 % en peso. Estos residuos con agua se depositan en las presas o depósitos para permitir que las partículas de mineral se sedimenten, y el agua se recupere a través de los “chinos” (tubos recolectores de agua). Dispositivos denominados así porque en California los chinos fueron los principales transgresores de las legislaciones tendientes a regular los jales en las minas (Rohe, 1994). En ocasiones, los jales se utilizan para rellenar espacios en las minas subterráneas que ya no serán explotados, con esta acción se pretende: i) no saturar las presas de jales; y ii) dar soporte a las estructuras rocosas para continuar la explotación del mineral en niveles adyacentes. En México, la gestión de las presas de jales es regulada a través de la NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece “el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales”(DOF, 2004).

La disposición de los jales con altos contenidos de agua no es la única forma como estos se pueden almacenar. En la actualidad, los avances en tecnologías de deshidratación permiten almacenar los jales en un estado menos saturado de agua. Este vital líquido pueden eliminarse en distintos grados hasta llegar a lo que se conoce como jales filtrados o secos, los cuales poseen menos de un 25 % de agua en peso (M. C. R. Davies, 2011). Son muy pocas las empresas mineras que han adoptado esta tecnología. En Canadá aproximadamente el 90 % de las minas continúan disponiendo jales en estado acuoso (MEND Project, 2017, p. 3). En el caso de México no existe información al respecto, no obstante las noticias mencionan que sólo unas cuantas mineras han iniciado a deshidratar sus jales, tal es el caso de First Majestic Silver Corp (2017). A grandes rasgos, el cuadro siguiente muestra las diferencias entre ambas formas de manejar los jales.

Cuadro 39 Diferencias entre el manejo de jales acuosos y secos

Tipos de jales	Manejo
Jales contenidos en un medio acuoso o convencionales	<ul style="list-style-type: none"> • Contienen hasta un 75 % de agua en peso • Su transporte y depósito se realiza por medios hidráulicos • Para disponerlos se requiere forzosamente una obra de contención llamada depósito o presa de jales • Dependiendo del tipo de obra la inversión inicial es pequeña y los costos de operación grandes, o viceversa • Fácil manejo del agua pluvial • Son susceptibles a desbordarse
Jales filtrados o secos	<ul style="list-style-type: none"> • Son secados por medios mecánicos • Contienen menos del 25 % de agua en peso • Su transporte y depósito se realiza por medios mecánicos • Para disponerlos no es forzoso una obra de contención • Tienen una mejor percepción pública, pues son poco susceptibles de desbordarse • Tienen menores impactos ambientales • Para eliminar el agua requieren maquinaria y equipo especializado de diversos tipos para trabajo continuo y permanente • Su inversión inicial y costos de operación muy elevados

Fuente: elaboración propia con datos de Oscar Vega Roldán (2019).

La tecnología de filtración permite una mayor recuperación del agua de proceso que otras tecnologías. Esta acción es muy importante en los lugares donde este vital líquido es escaso (Fitton & Roshdieh, 2013). Los jales secos o filtrados pueden no requerir de una obra de contención, sin embargo, el hecho de secarlos por medios mecánicos y, con ello, pasarlos a una fase más manejable disminuye significativamente los accidentes (Vega Roldán, 2019). También, unas de las principales ventajas de los jales filtrados es que pueden pasar a la etapa de remediación casi inmediatamente. Esto permite cierres progresivos de las instalaciones, y una disminución considerable de los impactos ambientales, como la emisión de polvos fugitivos, las infiltraciones, y la generación de drenaje ácido (M. C. R. Davies, 2011). La principal desventaja de esta tecnología es que se requiere una gran inversión inicial y durante su operación (Carneiro & Fourie, 2018, pp. 448 y 450). No obstante, a diferencia de los jales convencionales, los costos de la remediación de jales secos son menores (Carneiro & Fourie, 2018, p. 453).

La tecnología empleada para manejar los jales convencionales es menos costosa que la utilizada para manejar los jales secos, tanto en su inversión inicial como en su operación.

Estos jales pueden transportarse y depositarse en las presas por medios hidráulicos. El hecho de que contengan una gran cantidad de agua permite que fluyan con mayor facilidad que los jales secos y que requieran menores cantidades de energía para su transporte, en este sentido existe un ahorro económico. También ese gran contenido de agua, hace que requieran forzosamente una obra de contención, la cual comúnmente es construida con los mismos jales, aunque también se pueden utilizar materiales pétreos y enrocamientos de la región. En especial, el uso de jales obliga a que el diseño de un depósito o presa de jales tenga que estudiarse detalladamente antes de su construcción, para prevenir que los jales no se derramen sobre la cortina y provoquen daños o la rotura de esta estructura. Estas obras deben ser seguras, pues si se llegan a romper pueden ocasionar grandes accidentes (Vega Roldán, 2019). Uno de los más devastadores ocurrió el 25 de enero del 2019, cuando una presa de jales propiedad de la minera Vale, ubicada en el sureste de Brasil, se derramó y causó la muerte de decenas de personas (El País, 2019a).

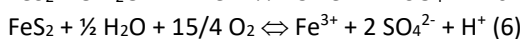
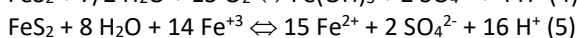
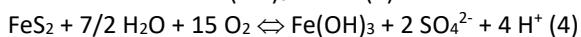
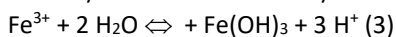
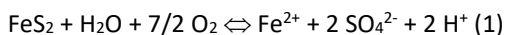
La construcción de presas convencionales de agua es un proceso único, en tanto que las de jales se van construyendo paulatinamente hasta llegar a un límite. Los terraplenes continuamente aumentan de altura y de anchura, para dar cabida a la llegada de más jales, lo que puede propiciar notables condiciones de inestabilidad que deben ser atendidas so pena de causar un accidente (Blight, 1998, p. 9). Las presas de jales construidas con materias pétreos y enrocamientos de la región son más estables, guardan mayor similitud con las presas de agua que con las presas construidas con jales. De hecho, en México y en el mundo existe más experiencia y conocimiento en la construcción de presas de agua que en presas de jales. A pesar de que la NOM-141-SEMARNAT-2003 permite que la cortina contenedora se construya con los mismos jales, a la par del depósito de estos residuos, la realidad muestra que los jales convencionales son más pesados que la propia agua. Por esta característica es más seguro que las presas de jales se construyan con materiales de mayor resistencia (Vega Roldán, 2019). Así también, en ocasiones los sistemas de construcción no convencionales pueden ser utilizados para dar mayor estabilidad a las presas de jales, como los muros de contención a base de gaviones y los sistemas de suelo reforzado a base de

sistemas *Terramesh* (estructuras metálicas con características técnicas adecuadas a las presas de jales) (Torres Chung, 2020).

En resumen, la tecnología empleada para manejar los jales en México no ha cambiado mucho a lo largo de décadas, el concepto de presas de jales se conserva, aunque estas estructuras hayan adoptado nuevas tecnologías para su monitoreo, como es el caso de las estaciones robóticas para medir los movimientos superficiales. El ahorro en que incurren las empresas por no pagar los costos de las huellas ambientales y sociales hacen posible que México sea un país económica y legalmente atractivo para la actividad minera. El hecho de que la NOM-141-SEMARNAT-2003 no proponga un manejo de los jales acorde con las nuevas tecnologías, hace que sus disposiciones sean obsoletas y coadyuven con la degradación del ambiente.

Por otro lado, uno de los impactos ambientales más temidos al final de las operaciones mineras, es la generación de drenaje ácido de mina (DAM) procedente de la oxidación de sulfuros. Este tiene la posibilidad de generarse en las presas de jales, en los vertederos de rocas sin valor, y en las minas subterráneas y a cielo abierto. El drenaje ácido de mina junto con los elementos potencialmente tóxicos (EPT) que disuelve, puede constituir un serio problema ambiental, ya que puede infiltrarse o ser arrastrado por las lluvias hacia cuerpos de agua. Una vez que comienza la formación de drenaje ácido de mina, pueden formarse otros subproductos nocivos, en el caso de los sulfuros masivos se ha encontrado: sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, sulfato de hierro en solución, azufre elemental, compuestos de jarosita y la propia agua ácida (Ritcey, 2005, p. 6).

El drenaje ácido se forma cuando se oxidan los sulfuros metálicos presentes en los jales, como la pirita, las reacciones más comunes que ocurren, se presentan a continuación:



(Kefeni et al., 2017, p. 476)

Como se observa en la primera reacción, la pirita se combina con el oxígeno atmosférico y el agua para dar lugar a la formación del ion hierro (Fe^{+2}), el ion sulfato (SO_4^{2-}) y los iones de hidrógeno (H^+) causantes de la acidez de los jales. Luego, el Fe^{+2} en la segunda reacción, se puede volver a oxidar para dar lugar al Fe^{+3} . A las reacciones donde se forma este último ion, no se les ha dado la importancia que merecen, siendo que el Fe^{+3} puede oxidar a la galena, a la calcopirita, a la esfalerita cádmica y a la calcopirita, y liberar más acidez y más elementos potencialmente tóxicos (Romero, 2019). Si hay cantidades suficientemente altas de minerales de carbonato, el drenaje ácido de mina puede neutralizarse, pero aun así, algunos elementos potencialmente tóxicos, como el arsénico y el selenio, pueden estar presentes en concentraciones relativamente altas en estas aguas no tan ácidas (Jamieson, 2013, p. 381).

En conclusión, para que pueda ocurrir drenaje ácido se requiere oxígeno, agua y tiempo, aparte de la presencia de sulfuros metálicos como es el caso de la pirita o la arsenopirita. Si llegase a faltar uno de ellos, el proceso se vería truncado, una situación benéfica para el ambiente (Romero & Gutiérrez, 2010, p. 44). Es por esto que las alternativas para remediar las presas de jales buscan que estos residuos no entren en contacto con el oxígeno atmosférico o el agua. En este sentido los jales secos representan una técnica de manejo muy adecuado para impedir la formación de drenaje ácido, pues carecen de suficiente agua.

La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales es, generalmente, muy limitada durante la operación de la mina y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que cesa la acumulación en el depósito y la porosidad en el mismo permite la difusión del oxígeno atmosférico. Antes de que ocurra la oxidación de los jales, éstos no presentan signos visibles de alteración y por lo general son de color gris. Cuando ocurre la oxidación de los sulfuros metálicos, los jales presentan una coloración café, amarilla o roja (Romero & Gutiérrez, 2010, pp. 44–45).

Los impactos ambientales que pueden ocasionar los jales justifican que se realice un análisis del entorno socioeconómico y ambiental y, no sólo eso, se requiere una caracterización exhaustiva de los jales, donde se incluyan aspectos físicos, químicos y mineralógicos, con el fin de que se elijan las mejores estrategias para su manejo. Existe, en la actualidad, toda una gama de técnicas analíticas modernas para caracterizar

adecuadamente los jales, dentro de estas técnicas se encuentran: la espectroscopía de estructura fina de absorción de rayos X, la fluorescencia de rayos X de dispersión de energía polarizada, la difracción de rayos X, la microscopía electrónica de barrido, el microanálisis con sonda electrónica y la espectrometría de masas de plasma acoplada inductivamente. De manera especial, la técnica de evaluación cuantitativa de minerales mediante microscopía electrónica de barrido (QEMSCAN por sus siglas en inglés) ha adquirido un gran renombre en este campo, debido a su velocidad y a su precisión se ha convertido en el sistema dominante de imágenes mineralógicas en los últimos años (Guanira et al., 2020, p. 2).

La NOM-141-SEMARNAT-2003 propone dos pruebas para evaluar la peligrosidad de los jales: la extracción de los constituyentes tóxicos solubles, y la prueba modificada de balance ácido base.

Con el fin de determinar la peligrosidad de los jales, el generador debe proceder de la siguiente manera: 5.2.1 Aplicar la prueba de extracción de los constituyentes tóxicos, de acuerdo con el método de prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO₂ (véanse Anexos Normativos 1 y 5). Si la concentración en el extracto de uno o varios de los elementos listados en la Tabla referente a los constituyentes tóxicos en el extracto PECT de la NOM-052-SEMARNAT-1993 o la que la sustituya, es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales son peligrosos por su toxicidad. 5.2.2 Para determinar si los jales son generadores potenciales de ácido, se debe aplicar la prueba modificada de balance ácido base (véanse Anexos Normativos 1 y 5). En caso de que la relación Potencial de Neutralización (PN)/Potencial Acido (PA) sea menor a 1.2, se consideran generadores potenciales de ácido (DOF, 2004, p. incisos 5.2.1 y 5.2.2).

Las pruebas para predecir si se formará drenaje de ácido se clasifican en estáticas y en cinéticas. La elección de alguna de ellas depende de varios factores, dentro de los que se encuentran los costos y el tiempo de realización de la prueba. Las pruebas estáticas realizan un balance entre los productores de ácido (sulfuros), y los consumidores de ácido (normalmente minerales calcáreos); el resultado de este balance, se expresa como potencial de neutralización neto. Dependiendo del valor de este parámetro se define si un jal generará drenaje ácido. Las pruebas estáticas no consideran que el drenaje ácido se puede producir a tasas variables; tampoco reconocen que éste se puede neutralizar por otros minerales, no sólo los calcáreos; ni que la meteorización tiene un efecto sobre las reacciones de neutralización a largo plazo. En general, las pruebas estáticas son catalogadas

como exámenes preliminares. Por su parte, las pruebas cinéticas se utilizan entre otros aspectos para: i) confirmar las pruebas estáticas; ii) determinar el efecto de la acción bacteriana; iii) evaluar la tasa de agotamiento de la capacidad de neutralización; y iv) determinar los cambios biogeoquímicos generales. Una investigación desarrollada en Canadá sobre los métodos predictivos de drenaje ácido determinó que las pruebas estáticas son útiles sólo como una guía, no predicen con exactitud la formación de drenaje ácido (Ritcey, 2005, pp. 8–9).

La prueba modificada de balance ácido solicitada a las empresas mineras en el anexo 5 de la NOM-141-SEMARNAT-2003 es de tipo estática. Esta prueba sugiere que para determinar la capacidad que tienen los jales de generar drenaje ácido se debe determinar el potencial que tienen los carbonatos, los hidróxidos y los aluminosilicatos para neutralizar los minerales productores de ácido. Esta norma no considera que pueden existir otros minerales para neutralizar la acidez, aparte de los carbonatos, como las plagioclasas. Estos compuestos no son considerados en la NOM-141-SEMARNAT-2003 para predecir la formación de drenaje ácido, por lo que la técnica propuesta en esta norma no siempre arroja resultados verdaderos, sobre todo en yacimientos encajonados en rocas volcánicas donde se sabe de la existencia de plagioclasas (Romero, 2019).

Otra prueba que pide la NOM-141-SEMARNAT-2003 para determinar la peligrosidad de los jales es la prueba de extracción de los constituyentes tóxicos solubles. Esta prueba consiste en extraer metales y metaloides de los jales con agua destilada en equilibrio con dióxido de carbono a un pH de 5.5, para luego, cuantificarlos mediante espectroscopia de emisión atómica inductivamente acoplada a plasma y métodos de absorción atómica. Si algún contaminante se encuentra por arriba de los límites establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005, entonces, el jal se considerará peligroso (DOF, 2004, p. anexo 1 inciso 6.1). Esta última norma tiene por objetivo identificar si un residuo es: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico ambiental, inflamable o biológico-infeccioso (CRETIB).

Dicha prueba rara vez determinará constituyentes tóxicos solubles en jales cuando las operaciones mineras estén en fase productiva. Este fenómeno sólo se da en jales que han experimentado oxidación y, por lo tanto, poseen un pH bajo. Uno de los métodos

alternativos más comunes y robustos que se utilizan para realizar este tipo de pruebas son las celdas húmedas, no considerado en la NOM-141-SEMARNAT-2003. Este método es poco utilizado debido a que tarda en realizarse al menos 20 semanas, pero es más exacto para determinar los constituyentes que tendrá el drenaje de los jales expuestos a un intemperismo acelerado (Romero, 2019). Actualmente, la mayoría de los jales que se someten a la prueba de extracción de los constituyentes tóxicos solubles, resultan no peligrosos, cuando en realidad, la prueba a la que fueron sometidos no fue la más correcta.

La NOM-141-SEMARNAT-2003 en el punto 5.4.2 manifiesta que la preparación del lugar para construir una presa de jales requiere de medidas de prevención y control de la contaminación en acuíferos, cuando: i) se construya sobre un acuífero vulnerable; ii) el jal resulte peligroso; o iii) se tengan pozos profundos en una franja de 500 m (DOF, 2004, p. 5.4.2 inciso b). Una disposición que pocas veces se llevará a cabo, en lo que a la peligrosidad de los jales se refiere, dado que la prueba de evaluación presentada en el anexo normativo 1, no es muy confiable.

La NOM-141-SEMARNAT-2003 tampoco solicita el análisis de elementos de naturaleza no tóxica como el zinc o el fierro, con el fin de determinar si estos son susceptibles de liberarse o no, ya que pueden tener efectos positivos o negativos durante el cierre de las presas de jales. Pues participan en reacciones geoquímicas que pueden llegar a modificar ciertos parámetros geotécnicos, como la cohesión y la fricción de las cortinas de las presas construidas con jales. Por ejemplo, el fierro liberado en grandes cantidades, puede dar mayor estabilidad a las cortinas de las presas de jales (Romero, 2019).

En la práctica, las pruebas solicitadas en la NOM-141-SEMARNAT-2003 no son suficientes para predecir el comportamiento de los jales en el ambiente, ni para elegir las mejores estrategias de remediación. Paradójicamente existen pruebas más robustas que se pueden solicitar a las empresas mineras para comprobar la generación potencial de acidez, y para la medición de la concentración total de los elementos potencialmente tóxicos. La caracterización mineralógica y geoquímica de los jales también es un aspecto no contemplado en la norma NOM-141-SEMARNAT-2003 que pudiera ser solicitado para identificar las posibles reacciones químicas que pudieran ocurrir, y los mecanismos que

podrían facilitar la movilidad o la retención de los elementos potencialmente tóxicos (Romero, 2019).

Una norma muy relacionada con la NOM-141-SEMARNAT-2003 es la NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Esta norma propone pruebas más complejas para analizar los jales que la NOM-141-SEMARNAT-2003, como son: i) las concentraciones totales (base seca) de: antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio; ii) la movilidad de los metales y metaloides presentes en el residuo; y iii) el potencial de generación de drenaje ácido (DOF, 2011, p. incisos 5.4.2.1 y 5.4.2.2). Pero, aun así, siguen siendo insuficientes para pronosticar el comportamiento de los jales en el ambiente y proponer un plan de manejo óptimo que permita minimizar los riesgos de estos residuos.⁵⁰

Los riesgos de los jales en los ecosistemas están relacionados principalmente con la capacidad de generar drenaje ácido y arrastrar los elementos potencialmente tóxicos; los riesgos a la salud humana se asocian principalmente con la dispersión eólica de contaminantes; y los riesgos sobre las estructuras están relacionados principalmente con la inestabilidad de las presas de jales, lo que en un momento dado pudiera ocasionar graves accidentes (Crespo et al., 2019, p. 19).

En conclusión, los jales han sido la causa de un sinnúmero de accidentes graves, una mayor degradación ambiental y una mayor afectación a la salud de la población. Pese a que existe toda la tecnología disponible, la legislación no solicita a las empresas mineras realizar pruebas de laboratorio suficientemente robustas para identificar los riesgos que los jales pudieran generar en los alrededores de las operaciones mineras y prevenir su desarrollo. Estas pruebas son la base de una gestión sustentable de los jales. Si bien su costo económico es alto, más del 90 % de la producción de metales en México se encuentra en manos de la

⁵⁰ Plan de Manejo: “Instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno” (DOF, 2018c, p. art. 3 inciso XXI).

gran minería con la capacidad económica suficiente para gestionar un mejor manejo de los yales.

5.6 La legislación ambiental y los gases efecto invernadero en la minería

En el siguiente apartado se analiza hasta qué grado se ha desarrollado la legislación ambiental en materia de regulación de gases efecto invernadero y cuál ha sido su contribución para mitigar el cambio climático en la minería. Una actividad que genera GEI dentro de sus distintos procesos, siendo los más representativos el dióxido de carbono (CO₂) y el óxido nitroso (NO₂) (INECC, 2018d).

Las estadísticas ambientales sobre compuestos y gases de efecto invernadero desarrolladas conforme a las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), sugieren que la minería se encuentra representada dentro de la categoría de industrias manufactura y de la construcción (1A2). Esta categoría ocupó el tercer lugar en generación de GEI durante el 2015 con un 13.2 %, antecedida por el transporte (35 %) y las industrias de la energía (34.2 %) (INECC, 2018b, p. 7); y además, incrementó sus emisiones un 24.9 % durante el periodo 1990-2015 (INECC, 2018b, p. 19). Dentro de esta categoría, la minería está representada dentro de las subcategorías de Metales no ferrosos (1A2b) y de Minería (con excepción de combustibles) y cantería (1A2i).

Un análisis de estas subcategorías muestra que tienen una tendencia al alza en la emisión de CO₂-e. La minería (con excepción de combustibles) y cantería aumento sus emisiones de CO₂-e en un 46 % durante el periodo 2000 – 2017, en tanto que las empresas pertenecientes al grupo de metales no ferrosos también aumentaron sus emisiones un 13.5 % durante este mismo periodo (INECC, 2018c). Esto corrobora un aumento de la producción de metales durante este siglo y una mayor degradación del ambiente por el aumento de emisiones GEI.

Por sus alcances económicos, políticos, sociales y ambientales, el cambio climático es uno de los fenómenos ambientales que más ha sido analizado desde el siglo pasado. Varios científicos comentan que este fenómeno al igual que el manejo de las armas nucleares es uno de los peligros de mayor trascendencia para la humanidad. Los

acontecimientos internacionales más relevantes que llevaron al desarrollo de una política global en materia de cambio climático se pueden ubicar en cuatro etapas, las cuales se resumen a continuación.

La primera etapa se ubica antes de los noventa cuando diversos actores alertaron de problemas en el ambiente, como Rachel Carson con su libro *La Primavera Silenciosa* publicado en 1962. Esta etapa se encuentra muy aparejada con una serie de hechos que mostraron al mundo los efectos de seguir fomentando políticas económicas tendientes a fortalecer un puñado de empresas, dejando de lado el mejoramiento de las condiciones ambientales y sociales. En esta etapa comenzaron a presentarse evidencias científicas de que el clima en el planeta estaba cambiando. Paralelamente se desarrollaron los primeros acontecimientos mundiales que sustentaron la política internacional en materia de cambio climático. Dentro de estos acontecimientos destaca el desarrollo de la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima (1979) celebrada en Ginebra, Suiza, la cual reconoció el cambio climático como un problema mundial; y la creación del IPCC (UN, s/f).

La segunda etapa comenzó en los años noventa con la negociación y adopción de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El IPCC y la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima realizada en 1990 propusieron que los países en desarrollo deberían adoptar medidas tendientes a reducir las emisiones globales y a colaborar con los países en desarrollo para hacer frente al cambio climático. En la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro (1992), la CMNUCC fue adoptada por la mayoría de los países en el mundo. En esta etapa el cambio climático llegó a ser considerado uno de los fenómenos ambientales más catastróficos. Después que la CMNUCC entró en vigor en 1994, se celebró la primera conferencia de las partes (CP1) en Berlín en 1995 (UN, s/f).

La tercera etapa surge con la negociación y adopción del Protocolo de Kioto. Esta etapa fortaleció la CMNUCC que surgió como un acuerdo de buena voluntad, pues el Protocolo de Kioto adoptado en la CP3 (1997) propuso metas para reducir seis gases de efecto invernadero. Fue el primer instrumento que comprometió jurídicamente a los países desarrollados a reducir sus emisiones. Antes de su entrada en vigor en el 2005, los acuerdos de Marrakech que especificaban las normas de su aplicación fueron adoptados en la CP7

(2001). Posteriormente surgieron otras negociaciones entorno a este protocolo como la Enmienda de Doha (2012), la cual involucró nuevos compromisos para los países firmantes del anexo 1 (UN, s/f).

Por último, la cuarta etapa comenzó en la segunda década del siglo XXI con la negociación y adopción del Acuerdo de París. Este nuevo acuerdo tiene sus orígenes en la CP17 (2011) cuando los gobiernos en Durban reconocieron la necesidad de crear un nuevo acuerdo universal para hacer frente al cambio climático después del 2020 (UN, s/f). El Acuerdo de París fue negociado en la COP21 (2015) por los 195 países miembros de la CMNUCC para sustituir al Protocolo de Kioto desde el 2020. Su adopción se dio el 22 de abril de 2016. Los países con más emisiones en el mundo: China y Estados Unidos, ratificaron este acuerdo dos meses antes de su entrada en vigor el 4 de noviembre del 2016. No obstante, Estados Unidos ha formalizado la salida de este acuerdo, un suceso que podría darse en noviembre de 2020 (El País, 2019b).

Los elementos normativos más importantes que han sustentado la política global del cambio climático son: la CMNUCC, el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París. México firmó la CMNUCC en 1992, el mismo año que se adoptó a nivel internacional, sin embargo, este instrumento fue ratificado por el Senado de la República en 1993. El protocolo de Kioto fue firmado en 1997 cuando se promulgó por primera vez, pero el Senado de la República lo ratificó hasta el 2000. Estos instrumentos entraron en vigor el 21 de marzo de 1994 y el 6 de febrero de 2005 respectivamente (DOF, 2009).

Por último, México se suscribió al Acuerdo de París el 22 de abril de 2016, y lo ratificó el 17 de septiembre de 2016 (DOF, 2016b). Pero antes presentó su Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (iNDC por sus siglas en inglés) a la CMNUCC el 30 de marzo de 2015 por conducto de la SEMANART. La propuesta de iNDC incluía acciones para la mitigación de GEI y para la adaptación al cambio climático, además, definía dos niveles de compromiso, acciones sujetas a contribuciones condicionadas, y no condicionadas, a partir de la actualización del INEGyCEI (2013). El compromiso sujeto a contribuciones

condicionadas, proponía la reducción del 22 % de las emisiones de GEI en el 2030, tomando como línea base el 2013 (INECC, 2018a, p. 4).⁵¹

México ha configurado todo un andamiaje institucional para dar cumplimiento a la política internacional de cambio climático. En un primer momento, SEMARNAP (ahora SEMARNAT) presentó a consideración pública un documento para formular programas nacionales para mitigar las emisiones de GEI y promover acciones de adaptación ante los efectos adversos del cambio climático en el 2000. Después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto, se creó la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) el 25 de abril 2005 para coordinar la formulación de políticas en la materia. La CICC publicó el documento *Hacia una Estrategia Nacional de Acción Climática* (HENAC) en noviembre 2006, que dio origen a la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) (2007-2012) publicada el 25 de mayo de 2007. Posteriormente, con fundamento en la ENCC y en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2007 – 2012 se elaboró el Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2009-2012 y el Programa de Mitigación y Adaptación del Cambio Climático 2009-2012 (DOF, 2009).

A finales del sexenio 2007-2012, se promulgó la Ley General de Cambio Climático (2012) (LGCC). Este instrumento jurídico ordenó la integración y el funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático (DOF, 2018h, p. 27 art. 38). Un sistema orientado a generar sinergias entre las instituciones gubernamentales para enfrentar la vulnerabilidad y los riesgos, y para establecer acciones de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático (Comisión Europea, 2019, p. 108).

El Sistema Nacional de Cambio Climático estará integrado por la Comisión, el Consejo, el INECC, los gobiernos de las Entidades Federativas, un representante de cada una de las asociaciones nacionales, de autoridades municipales legalmente reconocidas y representantes del Congreso de la Unión (DOF, 2018h, p. 27 art. 40).

La LGCC también establece los principales instrumentos de planeación de la política ambiental en la materia, dentro de los cuales se encuentran la ENCC y el PECC (DOF, 2018h, p. 32 art. 58). La primera ENCC bajo la LGCC fue promulgada el 3 de junio de 2013 (DOF,

⁵¹ Las contribuciones no condicionadas son aquellas que el país desarrollará con sus propios medios, a diferencia de las condicionadas donde se prevé apoyo internacional.

2013a). La ENCC (2013-2018) fue concebida como un instrumento rector de la política nacional, en ella se describen los ejes estratégicos y las líneas de acción de las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático (Comisión Europea, 2019, p. 108). México presentó también en la COP22 de noviembre de 2016, el documento denominado *Mexico's Climate Change Mid-Century Strategy*, un instrumento que guía la política nacional en materia de cambio climático hacia el 2050 (SEMARNAT-INECC, 2016).

La LGCC también creó otro actor importante dentro de la política ambiental nacional, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Un organismo público descentralizado de la administración pública federal, con personalidad jurídica, patrimonio propio y autonomía de gestión, sectorizado en la SEMARNAT (DOF, 2018h, p. 11 art. 13). Este instituto tiene múltiples funciones dentro de ellas, brindar apoyo técnico y científico a la SEMARNAT encargada de conducir la política ambiental (DOF, 2018h, p. 11 art. 15).

La LGCC mostró un poco más de dinamismo después de la publicación del Reglamento de la Ley de Cambio Climático en materia del Registro Nacional de Emisiones a finales del 2014. Un instrumento jurídico que ordenó la creación del Registro Nacional de Emisiones (RENE), una herramienta que proporciona información al gobierno sobre las emisiones generadas por las empresas en un año corriente. De manera resumida este reglamento establece que los establecimientos que generen 25 000 tCO₂- por año, o una cantidad superior a esta cifra, deben reportarla anualmente en la COA para alimentar al RENE. Este umbral incluye tanto las emisiones directas como las indirectas (DOF, 2014d, p. 11 art. 6).⁵²

Con la publicación de este nuevo instrumento jurídico algunas las disposiciones indicadas en la LGCC entraron en la esfera de la práctica. Por su parte el mercado de bienes y servicios ambientales continuó consolidándose, el artículo 16 ordenó a las empresas

⁵² Las emisiones indirectas son los gases o compuestos de efecto invernadero que se generan fuera de las empresas como consecuencia del consumo de energía eléctrica y térmica (DOF, 2014d, p. 1, art. 2).

integrar cada tres años un dictamen de verificación de sus emisiones expedido por un organismo acreditado para tales fines (DOF, 2014d, p. 17).

La LGCC ha sido reformada en varias ocasiones después de su aparición, una de las reformas más importantes fue la desarrollada el 13 de julio de 2018. Durante esta última reforma se establecieron las bases para cumplir con los compromisos de México en el Acuerdo de París (DOF, 2018g, p. 40 art. 2 inciso VIII). Una de estas bases es el establecimiento gradual del Sistema de Comercio de Emisiones (SCE) para promover la reducción de emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero, de acuerdo con los compromisos asumidos a nivel internacional, y sin quebrantar la competitividad internacional de los sectores participantes (DOF, 2018g, p. 44 art. 94).

Que por Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el trece de julio de dos mil dieciocho, se reformaron y adicionaron diversas disposiciones de la Ley General de Cambio Climático para incorporar a dicho ordenamiento los compromisos internacionales de México, adquiridos por virtud del Acuerdo de París y la Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional, mediante los cuales nuestro País se compromete a reducir, de manera no condicionada, un 22% de sus emisiones de gases de efecto invernadero y un 51% de sus emisiones de carbono negro al año 2030 con respecto a la línea base (DOF, 2019f, p. 16).

El SCE a cargo de la SEMARNAT se diseñó en base a etapas, retomando la experiencia de la Unión Europea. Las bases preliminares de la primera etapa o programa de prueba se publicaron el 1 de octubre de 2019 en el DOF. Este programa inicial tendrá una vigencia de treinta y seis meses y no poseerá efectos económicos (DOF, 2019f, p. 16). Además, se dividirá en la fase piloto que durará dos años y la fase de transición hacia la etapa operativa que tendrá una vigencia de un año. El programa de prueba asignará gratuitamente derechos de emisión a las empresas participantes en proporciones equivalentes a las emisiones reportadas en el RENE (DOF, 2019f, p. 20 art. sexto). La cantidad de derechos de emisión que se otorguen en el programa de prueba y en la etapa operativa estará definido por la información histórica y las metas establecidas en la LGCC (DOF, 2019f, p. 22 art. 12).

A la vez, la SEMARNAT gestionará una reserva de derechos de emisión para nuevos participantes y para las subastas (DOF, 2019f, p. 22 arts. 13 y 14). Paralelamente establecerá mecanismos flexibles de cumplimiento, los cuales pueden ser un esquema de compensación a través de proyectos o actividades de mitigación elegibles, o el

reconocimiento de acciones tempranas para proyectos o actividades de mitigación que hayan recibido créditos de compensación externos antes de la entrada en vigor del programa de prueba (DOF, 2019f, p. 25 art. 33).

El desarrollo del presente SCE tiene como objetivo limitar la emisión de GEI en el ambiente. A primera vista este es un aspecto positivo para la legislación ambiental que se ha desarrollado sin considerar los volúmenes de contaminantes emitidos a la atmósfera. Sin embargo, el programa de prueba presenta características que impiden que la mayoría de las empresas mineras no participen en esta primera etapa. La primera es que el programa de prueba está dirigido sólo a aquellas instalaciones que emiten anualmente 100 000 toneladas de emisiones directas de bióxido de carbono o más, no se considera otro tipo de GEI en esta fase (DOF, 2019f, pp. 20–21 art. 8). La SEMARNAT eligió esta condicionante porque más del 90 % de las emisiones reportadas en el RENE están contempladas en las instalaciones que reúnen esta condición (DOF, 2019f, p. 16). No obstante, deja fuera un sinnúmero de instalaciones generadoras de bióxido de carbono, limitando con ello su participación en acciones de reducción de GEI.

Bajo esta consideración y revisando las instalaciones que emitieron bióxido de carbono y se registraron en el RETC (2018), se indaga que sólo algunas empresas del sector metalúrgico (donde se incluyen las mineras) serán consideradas dentro del SCE.⁵³ En el cuadro siguiente se presentan las instalaciones del sector metalúrgico que produjeron más de 100 000 toneladas de bióxido de carbono en el 2018 y que reportaron en el RETC (2018). Como se observa, sólo cinco instalaciones mineras sobrepasaron el límite establecido en el programa de prueba del SCE. Si se considera que el SGM reportó la existencia de 99 proyectos mineros extranjeros en producción hasta principios del 2019 (2019b), la mayoría de las empresas mineras no entraron en la primera etapa del SCE.

⁵³ El bióxido de carbono es un GEI reportado tanto en el RETC como en el RENE. Se retoma el RETC debido a que los datos de emisión de GEI por empresa no están disponibles en las estadísticas del RENE presentadas en línea.

Cuadro 40 Principales empresas del sector metalúrgico emisoras de bióxido de carbono según información del RETC (2018)

Empresa	Estado	Cantidad de CO2 emitida en el 2018
Ternium México S.A. de C.V.	Nuevo León	458 689.75
Minera Peñasquito S.A. de C.V.	Zacatecas	424 808.70
Compañía Minera Autlán S.A.B. de C.V. Unidad Molango	Hidalgo	383 897.36
Refractarios Básicos S.A. de C.V. Unidad Mitras	Nuevo León	279 435.27
Mexicana de Cobre S.A. de C.V.	Sonora	187 162.20
Metalurgia Met-Mex Peñoles S.A. de C.V.	Coahuila	172 707.80
TA 2000 S.A. de C.V.	Veracruz	138 227.13
NEMAK S.A.B. de C.V.	Nuevo León	119 357.72
Mexicana de Cobre, S.A. de C.V. Complejo minero La Caridad	Sonora	118 620.14
Desarrollos Mineros San Luis S.A. de C.V. Unidad Minera Los Filos	Guerrero	116 788.87

Fuente: elaboración propia con datos del RETC (2018) (SEMARNAT, s/f).

La segunda característica es que sólo se consideran las emisiones de bióxido de carbono en el programa de prueba y no otros gases como el óxido nitroso que tiene un potencial de calentamiento superior al bióxido de carbono y que es producido por las empresas mineras. Este hecho también limita en gran medida el ingreso de empresas mineras al SCE. Posiblemente las etapas siguientes de este sistema amplíen las condicionantes para que pueda ingresar un mayor número de empresas mineras. Una necesidad que se vislumbra en los estados, cuando han tratado de imponer impuestos ecológicos sobre las emisiones de GEI, como es el caso de Zacatecas. Un estado cuya legislación hacendaria prevé el cobro impuestos ecológicos a aquellas empresas ubicadas en su territorio que generen emisiones de GEI, como es el caso de las mineras. Un impuesto validado constitucionalmente por la SCJN en la sesión pública número 14 ordinaria del día 11 de febrero de 2019 (SCJN, 2019).

Son objeto de este impuesto las emisiones a la atmósfera de determinadas sustancias generadas en los procesos productivos que se desarrollen en el Estado y que afecten el territorio del mismo. Para los efectos de este impuesto se considera emisión a la atmósfera, la expulsión directa o indirecta de bióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluoro-carbonos y hexafluoruro de azufre, ya sea unitariamente o de cualquier combinación de ellos que afecten la calidad del aire, los componentes de la atmósfera y que

constituyen gases de efecto invernadero que impactan en deterioro ambiental por provocar calentamiento global (Periódico Oficial del Estado de Zacatecas, 2018, p. 6 art. 14).

Por último, la tercera característica que impide que ingrese un mayor número de proyectos mineros en el programa de prueba, obedece a que está dirigido a instalaciones no a empresas. Sin embargo, las empresas mineras pueden poseer dos o más instalaciones o proyectos mineros que en conjunto pueden emitir 100 000 toneladas de emisiones directas de bióxido de carbono o una cantidad superior. Pero el hecho de que estén ubicadas en diferentes lugares no las hace participes de este programa. Pese a que las emisiones de GEI tienen un mismo destino, la atmósfera.

En conclusión, el desarrollo de la legislación en materia de cambio climático en México obedece en gran medida a los compromisos asumidos por este país a nivel internacional, más que a la voluntad de las autoridades ambientales. Es una de las legislaciones que involucra un mayor número de instituciones en México. En materia de instrumentos de mercado las emisiones GEI inician a ser reguladas no sólo por la federación sino también por los estados. La federación ha impuesto el SCE y algunos estados vislumbran el cobro de impuestos ecológicos. El desarrollo del SCE tiene como objetivo limitar la emisión de GEI en el ambiente un aspecto positivo para la legislación ambiental que se ha desarrollado sin considerar los volúmenes de emisión de contaminantes. En estos momentos el avance práctico que se tiene en el SCE no es substancial, pocas empresas mineras han sido contempladas en el programa de prueba. No obstante, se espera que en el futuro este programa trascienda a un mayor número de empresas.

5.7 La legislación ambiental y el principio de precaución

Organismos internacionales como el PNUMA han alertado que existe una pandemia química a nivel global. La cantidad de sustancias químicas liberada al ambiente es desconocida, no obstante, los registros de transferencia y emisión de contaminantes de los países pertenecientes a la OCDE han dado muestras de la magnitud de este suceso. En su afán por contrarrestar los efectos de esta catástrofe diversos países han adoptado elementos normativos en sus marcos regulatorios como el principio de precaución (PP) y el análisis de riesgo.

El presente apartado indaga por qué la aplicación del PP puede llegar a ser más importante que el análisis de riesgo en la gestión de actividades industriales contaminantes como la minería. Un principio que no incluye procedimientos metodológicos como el análisis del riesgo, pero si considera la evidencia empírica acumulada a través de la historia sobre la peligrosidad de las sustancias químicas, un aspecto que pudiera ser más importante que la misma ciencia cuando se trata de preservar la salud humana y el ambiente. También se investiga hasta qué grado el PP ha sido adoptado en la legislación ambiental, un elemento de suma importancia cuando se habla de actividades industriales que utilizan y emiten grandes cantidades de sustancias químicas al ambiente.

La comprensión de los usos y los efectos de las sustancias químicas sobre los seres vivos y el ambiente se encuentra muy aparejada con la historia del capitalismo. Con cada revolución industrial, los procesos productivos han cambiado a una situación cualitativa y cuantitativa nueva. De igual forma, los problemas ambientales también han experimentado una mayor extensión espacial y temporal.

Los años setenta y ochenta fueron escenario de una serie de hechos que dilucidaron que los problemas ambientales pueden llegar a comprometer la existencia del ser humano sobre la tierra. Dentro de estos hechos se encuentran la emisión de una nube de dioxina en Seveso, Italia (1976), la fuga de isocianato de metilo de la fábrica de plaguicidas Union Carbide en Bhopal, India (1984), y el estallido del reactor nuclear en Chernobyl, Ucrania (1986). La disminución de estas catástrofes a través de la consolidación de mejores regulaciones no ha sido un proceso fácil. Históricamente, la legislación se ha desarrollado entre dos lógicas contradictorias, por un lado, la necesidad de luchar contra los daños ambientales y, por el otro, legitimar el crecimiento industrial como una forma de prolongar el desarrollo económico. Tratar de conciliar estas lógicas ha sido todo un desafío para las instituciones encargadas de conducir las políticas ambientales (Boudia & Jas, 2014, pp. 4–5).

A pesar de que se han conformado marcos regulatorios más completos y estructurados, la cantidad de sustancias químicas producidas y emitidas al ambiente continua en ascenso. Una muestra de ello se encuentra en los registros de emisiones y

transferencia de contaminantes de México, Estados Unidos y Canadá. Un breve acercamiento a los registros del 2017 indicó que México reportó la emisión y transferencia de 134 479 418 toneladas de sustancias químicas (SEMARNAT, s/f), en tanto que Estados Unidos y Canadá reportaron 13 866 307 y 4 920 807 toneladas respectivamente (EPA, 2019a, p. 29; Government of Canada, 2020). Un análisis más profundo sobre estas emisiones y transferencias se presenta en el apartado 6.2.

Visto retrospectivamente, la legislación se fortaleció por primera vez entre los años treinta y principios de los cincuenta cuando solicitó la evaluación toxicológica de un producto antes de ser autorizado. Esta medida fue adoptada por varios países y para varias sustancias contenidas en fármacos, pesticidas y aditivos alimentarios. Un ejemplo de este enfoque se encuentra en la ley *The Food, Drug, and Cosmetic Act*, aprobada por el Congreso de Estados Unidos en el año de 1938 (Boudia & Jas, 2014, p. 6). No obstante, estas modificaciones legales no pudieron enfrentar otros acontecimientos de mayor riesgo ocurridos después de la Segunda Guerra Mundial. Los marcos legales no han evolucionado a la par del desarrollo de los diversos sectores industriales, lo que se ha traducido en un aumento de la contaminación ambiental (Boudia & Jas, 2014, p. 6).

Las bases fundamentales de las regulaciones de sustancias químicas pueden ser encontradas entre los años sesenta y ochenta. En este periodo se desarrolló el análisis del riesgo, un paradigma enfocado a analizar de manera transversal distintos problemas ambientales con diferentes niveles de riesgo (Boudia, 2014, p. 96). También se gestó el PP, surgió en la República Federal de Alemania en los años setenta. Es cierto que otros países como Estados Unidos y Reino Unido ya consideraban el uso de políticas precautorias en el ámbito ambiental, pero la República Federal de Alemania adoptó una filosofía más amplia, al considerar que los gobiernos deberían anticipar y prevenir riesgos. En ese tenor, este país utilizó el PP (*Vorsorgeprinzip* en alemán) para justificar el desarrollo de políticas más vigorosas contra la contaminación del Mar del Norte, la lluvia ácida y el calentamiento global (Jordan & O’Riordan, 2004, p. 33). Los jefes de Estado de la Unión Europea (UE) aprobaron la integración del PP en el Tratado de Maastricht en 1990 antes de su conclusión

(Jordan & O’Riordan, 2004, p. 34). El interés por el PP más allá de los límites de Europa creció durante los años ochenta y noventa (Jordan & O’Riordan, 2004, p. 36).

El primer instrumento legal internacional que adoptó este principio fue La Primera Conferencia Internacional sobre la Protección del Mar del Norte (1984), posteriormente, numerosos convenios y acuerdos internacionales lo han acogido, como la Declaración Ministerial de Bergen sobre desarrollo sustentable (1990), la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992). A nivel nación, ha habido países que lo han reivindicado en sus marcos legales como Suecia y Dinamarca. En el caso de Estados Unidos, las leyes o políticas ambientales no contemplan expresamente el PP, sin embargo, algunas de sus leyes son precautorias (Tickner & Raffensperger, 1999, p. 3).

Las políticas ambientales actuales intentan encontrar un equilibrio entre los efectos dañinos de las nuevas tecnologías y sus beneficios sociales. El análisis de riesgo ha sido la herramienta que muchos gobiernos han utilizado para probar si una sustancia química es segura. Un enfoque cuantitativo que, según sus defensores, se fundamenta en la ciencia sólida y no en juicios personales, religiosos o políticos de naturaleza no científica (McLean & Patterson, 2012, p. 27).

El objetivo principal de las técnicas de análisis de riesgo es obtener un valor numérico asociado con la probabilidad de ocurrencia de un accidente, el cual luego es gestionado y comunicado. Las instituciones encargadas de la política ambiental aceptan ciertos niveles de riesgo para su población en los marcos regulatorios. La experiencia ha mostrado que estas técnicas han calculado riesgos objetivos en el transporte, la ingeniería de procesos, las inundaciones bajo condiciones normales, las epidemias conocidas, entre otras áreas (Stirling, 2007, p. 310). Pero, en presencia de incertidumbre, ambigüedad e ignorancia, la fortaleza del análisis de riesgo se debilita dejando de ser racional, riguroso y robusto (Stirling, 2007, p. 312). Los gobiernos tratan de discernir hasta qué punto es conveniente sobrellevar los riesgos en vista de que a veces compensan otros beneficios, es así que las técnicas de análisis de riesgo normalmente terminan en análisis costo- beneficio,

donde diferentes elementos materiales, sociales y de percepción son reducidos a cantidades monetarias comparables.

Cuando no se tiene la seguridad o certeza de que un dato es verídico, se dice que existen condiciones de incertidumbre. En muchas ocasiones, la incertidumbre asociada al análisis de riesgo no se puede eliminar, como cuando los investigadores tratan de elegir la mejor especie animal que se asemeje a la heterogeneidad de la población humana para evaluar la toxicidad de ciertas sustancias carcinogénicas. La búsqueda de esta semejanza en muchas ocasiones se ha traducido en datos inciertos (Majone, 2010, p. 96).

En diversos países, los marcos regulatorios lidian con el riesgo permitiendo que se produzcan, usen y emitan sustancias, siempre y cuando no se excedan ciertos límites de contaminación establecidos en las normas ambientales. Estas regulaciones suponen que los ecosistemas tienen una determinada capacidad de asimilación de contaminantes, y que los organismos no presentan efectos adversos cuando se exponen a ciertas dosis por debajo del umbral de toxicidad (Thornton, 2000, p. 319). Consideraciones que pudieran estar alejadas de la realidad porque las normas ambientales generalmente se diseñan para todo un país y no para ecosistemas específicos y, además, no toman en cuenta aspectos como la existencia de distintos grados de sensibilidad de los organismos aún dentro de una misma especie.

El otorgamiento de permisos es el principal instrumento de las legislaciones ambientales, mediante ellos las empresas y los individuos pueden contaminar, pero sin rebasar los límites establecidos en la normatividad. Dichos límites se determinan mediante técnicas de análisis de riesgo y una serie de supuestos (Thornton, 2000, p. 319). La cuestión es que la gestión de las sustancias químicas a través del enfoque del análisis del riesgo, no ha logrado reducir la contaminación ambiental global. Además, en este tipo de regulaciones, la carga de prueba es asignada a las autoridades gubernamentales, quienes han demostrado que no tienen los recursos ni la capacidad suficiente para analizar cada una de las sustancias químicas con la velocidad que ingresan al mercado.

El PP es uno de los instrumentos normativos más conocido en el ámbito de las políticas ambientales internacionales y nacionales, sin embargo, pocos países lo han reconocido como uno de los elementos principales en su sistema legislativo. Quienes lo han impulsado han tratado de hacer explícito el papel de la precaución, a pesar de que gran parte de su aplicación ha sido implícita. Los proponentes de este principio consideran que su adopción legal propiciará que la toma de decisiones en la política ambiental sea deliberada, transparente y coherente (Marchant, 2003, p. 1800). Todas las distintas versiones del PP concuerdan que no se requiere poseer información científica completa para evitar daños desconocidos, la definición del PP más conocida a nivel mundial, es la que se menciona en el principio 15 de la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo (1992).

Con el fin de proteger el medio ambiente, los Estados deberán aplicar ampliamente el criterio de precaución conforme a sus capacidades. Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente (UN, 1992).

La carrera por generar cuantiosas ganancias ha propiciado procesos productivos con mayores tendencias a afectar el ambiente. El hecho de desconocer la peligrosidad de una sustancia química no implica que será desalojada del mercado. De hecho, esta es una razón para que permanezca en esta esfera, se supone que las sustancias químicas no son nocivas hasta que se demuestre lo contrario. Sin embargo, la evidencia de su toxicidad puede no estar disponible en el momento, o llegar demasiado tarde. En estas condiciones, el PP es un principio de gran envergadura, dado que permite tomar decisiones hacia una previsión prudente. Una herramienta que anticipa y evita daños antes de que inicie una actividad incierta o sin una clara demostración de que no será dañina (Cooney, 2004, p. 5).

Ante la existencia de riesgos latentes, los gobiernos pueden tomar dos vías, la primera es no actuar hasta que se tenga evidencia de que una determinada actividad causa daño al ambiente. En este momento el caso se transfiere a los tribunales, quienes tendrán la obligación de investigar y, en su caso, de exigir la aplicación de medidas conducentes. Esta acción “*ex post*” obliga al infractor a adoptar medidas de remediación y control. En la segunda vía los gobiernos pueden evitar que se desarrolle una determinada actividad que

no se sabe si producirá efectos adversos a la salud humana o el ambiente, en este caso se habla de una acción “*ex ante*”, donde el PP juega un papel muy importante (Wiener & Rogers, 2002, p. 320).

El PP es un principio polémico por dos razones fundamentales: i) es un principio que presenta diversas definiciones en los distintos marcos legales internacionales y nacionales, y, ii) su implementación no ha sido un proceso sistemático (EEA, 2001, p. 12). A pesar de tantas controversias el PP se ha convertido en un principio del derecho internacional desde la Declaración de Río.

La consagración de este principio se produjo en 1992 en la Conferencia de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo, durante la que se aprobó la Declaración de Río, [...]. De ello se deriva que este principio ha experimentado una consolidación progresiva en el Derecho internacional del medio ambiente que lo ha convertido en un verdadero principio de derecho internacional de alcance general (European Commission, 2000, p. 10).

A manera de conciliar el análisis de riesgo y el PP, la Comisión Europea menciona que: “el principio de precaución debe considerarse en el ámbito de un planteamiento estructurado del análisis de riesgos, que comprende tres elementos: evaluación del riesgo, gestión del riesgo y comunicación del riesgo” (European Commission, 2000, pp. 2–3). Así para esta institución, el PP debería ser utilizado preferentemente en la etapa de gestión del riesgo, cuando el riesgo determinado es incierto. Resulta claro que esta posición busca compatibilizar ambas propuestas, sin embargo, en muchos casos se pueden presentar fronteras poco definidas.

El recurso al principio de precaución presupone que se han identificado los efectos potencialmente peligrosos derivados de un fenómeno, un producto o un proceso, y que la evaluación científica no permite determinar el riesgo con la certeza suficiente. La aplicación de un planteamiento basado en el principio de precaución debería empezar con una evaluación científica, lo más completa posible y, si fuera viable, identificando en cada fase el grado de incertidumbre científica. (European Commission, 2000, p. 3).

A nivel internacional organismos como la OCDE están a favor de una gestión ambiental con un enfoque en el análisis del riesgo, la publicación *Risk and Regulatory Policy: Improving the Governance of Risk* es una muestra de ello. Este informe pretende asesorar a los legisladores sobre cómo diseñar y mejorar las políticas para la gobernanza del riesgo (OCDE, 2010, p. 3). El capítulo *Strategic Issues in Risk Regulation and Risk Management*

escrito por Majone, hace alusión a una de las posiciones más controvertidas de la gestión ambiental, cuando menciona que es insostenible mantener en la práctica y en la teoría un riesgo cero, que la seguridad absoluta no es una meta regulatoria sensata (Majone, 2010, p. 94).

La política ambiental tiende a ser más analista que precautoria en México, aunque la gestión del análisis del riesgo no ha sido desarrollada en su totalidad. Este hecho es comprensible si se considera que la legislación ambiental mexicana inició a desarrollarse a partir de la aprobación del TLC y del ACAAN (DOF, 1993b), donde una de las Partes es Estados Unidos. Un país que, si bien posee políticas precautorias, también ha sido uno de los principales países promotores del análisis del riesgo.

El análisis de riesgo se estudia desde varias vertientes en México, en materia ambiental la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) establece que las actividades que manejen una o varias sustancias químicas del Primer y Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas (DOF, 1990a, 1992a) por arriba de los límites establecidos ameritan la evaluación del riesgo. En materia de salud, la Secretaría de Salud (SA) posee la norma oficial mexicana NOM-048-SSA1-1993, que establece el método normalizado para la evaluación de riesgos a la salud como consecuencia de agentes ambientales (DOF, 1996a). En tanto que en materia laboral, la Secretaría del Trabajo y Previsión (STPS) establece algunas normas para evaluar el riesgo como la NOM-010-STPS-2014, agentes químicos contaminantes del ambiente laboral - Reconocimiento, evaluación y control (DOF, 2014b).

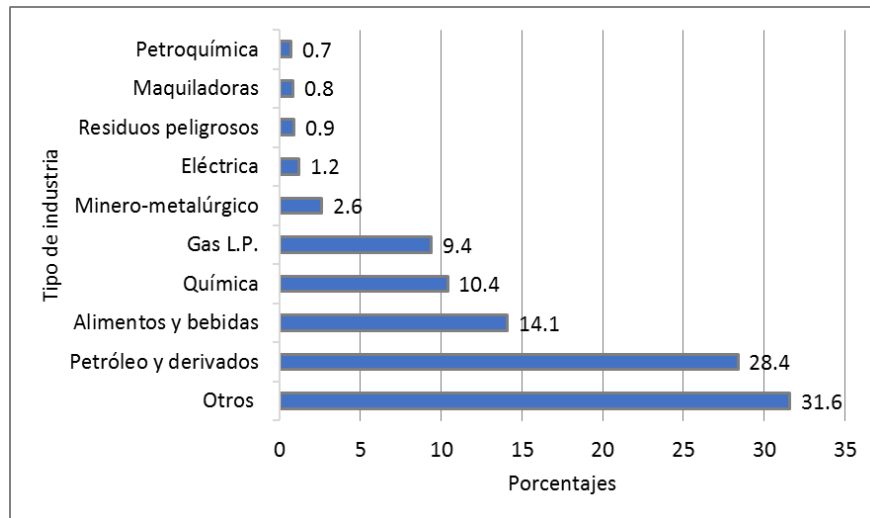
Un análisis de los instrumentos en materia ambiental deja entrever a primera vista dos particularidades, la primera es que los estudios de análisis de riesgo solicitados se limitan a las sustancias listadas en el Primer y Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas, si surgiera otra sustancia cuyos efectos fueran desconocidos, no se tendría la opción de investigar los riesgos que trae consigo. Peor aún, esta sustancia tendría la posibilidad de ingresar al mercado sin saber si es o no peligrosa para el ser humano o el ambiente. La segunda es que no existen límites de producción y uso de sustancias químicas

altamente riesgosas, se habla de una cantidad máxima para evaluar el riesgo, pero no de una cantidad máxima de uso y producción.

La minería se encuentra regulada por las disposiciones antes mencionadas, específicamente en materia ambiental, esta actividad es regulada porque rebasa la cantidad de reporte del cianuro de sodio establecida en el Primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas. En otras palabras, la minería utiliza más de un kilogramo por día de esta sustancia química para procesar minerales.

Dentro de las estadísticas de la SEMARNAT se especifica que durante el periodo 1992 – 2015 ingresaron alrededor de 10 380 estudios de análisis de riesgo a la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR). En la gráfica siguiente se puede observar que la rama industrial del petróleo y sus derivados fue quien ingresó más estudios de análisis de riesgo en el periodo analizado, en tanto que la minería ocupó el quinto lugar. Dentro de la legislación mexicana, un estudio de análisis de riesgo se acompaña de un Programa para la Prevención de Accidentes (PPA), un documento en el cual se plasman las medidas de prevención, control, corrección y mitigación de accidentes derivados del desarrollo de actividades altamente riesgosas. Durante el periodo 2007 – 2015 ingresaron a la DGGIMAR 2 934, de los cuales más del 80 % fueron autorizados. No obstante, no se menciona cuantos pertenecieron a la minería (SEMARNAT, 2016, p. 465).

Gráfica 23 Estudios de riesgo ambiental ingresados por tipo de industria 1992 - 2015



Fuente: Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (SEMARNAT, 2016, p. 463) Nota: a partir del 2 de marzo de 2015, la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos (ASEA) es responsable de los análisis de riesgo del sector hidrocarburos.

Si bien México es un país que promueve una gestión ambiental basada en el riesgo, algunas leyes ambientales ya mencionan dentro de su estructura el PP o un enfoque precautorio. En el cuadro siguiente se presenta un resumen de las leyes ambientales más importantes y su relación con el PP.

Cuadro 41 Leyes ambientales mexicanas y su relación con el principio de precaución

Leyes ambientales (última reforma)	Principal objetivo de estudio	Relación con el PP
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (5 de junio de 2018)	Preservación y restauración del equilibrio ecológico, y la protección al ambiente	No menciona el PP en su estructura
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (5 de junio de 2018)	Regulación y fomento del manejo integral y sustentable de los territorios forestales	Menciona un manejo forestal sustentable considerando la capacidad de carga de los ecosistemas y el PP
Ley de Aguas Nacionales (24 de marzo de 2016)	Regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas	No menciona el PP en su estructura
Ley General de Vida Silvestre (19 de enero de 2018)	Conservación y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre y su hábitat	No menciona el PP en su estructura, pero si habla en reiteradas ocasiones del aseguramiento precautorio de especies
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (19 de enero de 2018)	Protección del ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos	No menciona el PP en su estructura, pero si llega a hablar del aseguramiento precautorio de materiales y residuos peligrosos
Ley General de Cambio Climático (13 de julio de 2018)	Establecimiento de disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático	Menciona la necesidad de adoptar el PP para combatir los efectos adversos del cambio climático
Ley de Biodiversidad de Organismos Genéticamente Modificados (18 de marzo de 2005)	Regulación de las actividades de utilización confinada, liberación experimental, liberación en programa piloto, liberación comercial, comercialización, importación y exportación de organismos genéticamente modificados	Menciona la necesidad de adoptar el enfoque de precaución por parte del Estado en acciones para proteger el ambiente y la diversidad biológica

Fuente: elaboración propia con base en leyes ambientales vigentes de México (DOF, 2005a, 2016a, 2017, 2018b, 2018c, 2018d, 2018h).

Del cuadro anterior se observa que la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable y la Ley General de Cambio Climático ya incluyen dentro de su estructura el PP. Sin embargo, llama la atención que la LGEEPA, ícono del sistema de gestión ambiental de México aún no considera este principio dentro de su política ambiental, siendo que es la ley que regula las sustancias químicas que pueden contaminar el ambiente.

El hecho es que la contaminación continua cobrando vidas, aproximadamente siete millones de personas mueren anualmente por la emisión de sustancias al aire, un suceso considerado el de mayor riesgo (UNEP, s/f). Si bien a nivel internacional existe una preocupación por el aumento de las sustancias químicas en el ambiente, la realidad muestra que en la práctica no se ha optado por legislar un riesgo cero en la producción y en el uso de sustancias químicas. La gran cantidad de sustancias químicas que se usan y se producen superan las estrategias gubernamentales para evaluar su toxicidad; existe un problema de velocidad entre el mercado y los marcos regulatorios. Es una práctica común producir y usar sustancias químicas de toxicidad desconocida, para luego evidenciarlas como el origen de problemas ambientales y de salud. Tal fue el caso del insecticida dicloro difenil tricloroetano más conocido como DDT.

El análisis de riesgo se ha convertido en uno de los elementos regulatorios preferidos por los gobiernos y los defensores del mercado. Un enfoque que ha tenido gran éxito en áreas como el transporte, no obstante, cuando se habla de riesgos químicos las incertidumbres e ignorancias permean a la vista por varias cuestiones. Primero, este enfoque no está pensado para contaminantes persistentes y bioacumulables que tardan cientos de años para degradarse (Thornton, 2000, p. 319). Segundo, un análisis de riesgo sólo contempla la exposición a sustancias locales e inmediatas producto de una fábrica o un grupo de ellas, no considera las emisiones dispersas producto de otras instalaciones ubicadas a nivel regional o global (Thornton, 2000, p. 321).

Tercero, en un análisis de riesgo de mezclas químicas, los niveles de toxicidad de las sustancias químicas individuales normalmente se suman, no se considera que los químicos presentes en una mezcla pueden interactuar y hacer más compleja la tarea de evaluación de la toxicidad (Thornton, 2000, p. 322). Cuarto, no se tienen datos suficientes para desarrollar las técnicas de análisis de riesgo, la velocidad de generación de sustancias químicas es mayor que la capacidad de los gobiernos para evaluarlas (Thornton, 2000, p. 322). Quinto, el análisis de riesgo no considera la exposición a subproductos formados durante el uso o producción de una sustancia química determinada (Thornton, 2000, p. 323). Sexto, el análisis de riesgo está destinado a controlar los contaminantes en lugar de

evitarlos o prevenirlos, el resultado es una gran acumulación de basura a lo largo del tiempo y del espacio. Peor aún, cuando esta basura se procesa se pueden generar nuevos contaminantes (Thornton, 2000, p. 324).

En este contexto surge la necesidad de hacer uso del PP, el hecho de que este principio alerte sobre los posibles riesgos de una nueva tecnología, implica que es un principio racional comparable con los principios científicos que se aplican en la determinación del riesgo (Stirling, 2007, p. 312). El PP porta un cúmulo de evidencia empírica experimentada por el ser humano cada vez que se ha enfrentado a situaciones catastróficas. Esta experiencia ha constatado que cualquier nueva tecnología puede convertirse en un desastre de consecuencias inimaginables, por lo que el beneficio de la duda puede ser una herramienta normativa muy valiosa en los marcos normativos. Como su nombre lo dice el PP es un principio general que no involucra cálculos rigurosos como el análisis de riesgo, posiblemente esta sencillez lo ha conducido a grandes desacuerdos en su aplicación.

El resumen, el presente apartado muestra la importancia del PP en la gestión ambiental. Un principio que no arrastra la complejidad teórica y práctica del análisis de riesgo y que ha demostrado que la evidencia empírica puede llegar a ser más importante que la misma ciencia cuando se trata de preservar la salud y el ambiente. Una herramienta normativa muy valiosa para regular las actividades industriales que utilizan y emiten una gran cantidad de sustancias químicas, tal es el caso de la minería. Por su importancia, este principio ha iniciado a permear en muchos marcos teóricos, tal es el caso de México, un país que se caracteriza por ser más analítico que precautorio. La Ley de Desarrollo Forestal Sustentable y la Ley General de Cambio Climático ya incluyen dentro de su estructura el PP, sin embargo, es notable que la LGEEPA aún no lo incluya siendo que es la ley que regula las sustancias químicas que pueden contaminar el ambiente.

CAPÍTULO 6 LA DEGRADACIÓN DEL AMBIENTE Y LA MINERÍA DE MÉXICO

El presente capítulo dimensiona la degradación del ambiente en la minería de México. Para lograr este objetivo, en un primer apartado se realiza una descripción de los procesos mineros más comunes y su interrelación con el ambiente, para luego presentar estadísticas de los impactos ambientales más significativos. Posteriormente en un segundo apartado se analizan los contaminantes emitidos y transferidos por la minería en México, según datos del RETC, y se realizan algunas comparaciones con los registros de Canadá y Estados Unidos.

6.1 Los procesos mineros y su interrelación con el ambiente

Para iniciar este apartado, en el cuadro siguiente se presentan los procesos desarrollados por algunas empresas mineras ubicadas en México. Esta información procede en gran medida de las manifestaciones de impacto ambiental presentadas ante las autoridades ambientales para su resolución.

Como se observa, la lixiviación en pilas y la lixiviación dinámica son los principales procesos empleados para extraer el oro y la plata; en especial, la lixiviación en pilas es aplicada cuando se tienen yacimientos pobres en estos metales.⁵⁴ Estos procesos se acompañan de otros, como *Merril-Crowe*, depositación electrolítica y refinación para obtener barras metálicas comúnmente conocidas como barras doré, las cuales contienen metales preciosos y otros metales de menos valor. A su vez, la flotación selectiva es utilizada para obtener el plomo, el cobre y el zinc. Por supuesto, los productos finales de este proceso denominados concentrados, pueden contener cantidades significativas de oro, plata u otros metales, dependiendo de las características del yacimiento donde se haya realizado la explotación.

⁵⁴ Un yacimiento es definido como una concentración natural de uno o más minerales en un lecho rocoso, producto de una serie de procesos geológicos y cuya explotación generara un beneficio económico. Un yacimiento puede ubicarse superficialmente o estar escondido bajo cerros, ríos, arenas, cultivos o zonas forestales (Haldar, 2013, p. 7). A su vez, un mineral es definido como una sustancia inorgánica natural que posee una composición química y una estructura atómica definidas (Wills & Napier-Munn, 2006, p. 1).

Cuadro 42 Procesos desarrollados por algunas empresas mineras en México

Empresa	Ubicación	Metales extraídos	Procesos	Mineral procesado 2017 (t/d)
Minera Real de Ángeles Unidad “El Coronel”	Ojocaliente, Zacatecas	Plata y oro	Explotación a tajo abierto, trituración, lixiviación en pilas, absorción en carbón activado, depositación electrolítica y refinación	50 000
Minera Saucito Proyecto “Minera Saucito”	Fresnillo, Zacatecas	Plomo, zinc, plata y oro	Explotación subterránea, trituración, molienda y flotación selectiva	7 545 ⁵⁵
Minera Agnico Eagle México Proyecto “Pinos Altos”	Ocampo, Chihuahua	Plata y oro	Explotación a cielo abierto y subterránea, trituración y lixiviación dinámica	5 543
Minera Peñasquito “Proyecto Minero Peñasquito”	Mazapil, Zacatecas	Plata, oro, zinc y plomo	Explotación a tajo abierto, trituración, molienda, flotación selectiva, lixiviación en pilas, <i>Merril – Crowe</i> , refinación y lixiviación de pirita	149 000
Minera Penmont “Proyecto Noche Buena”	Caborca, Sonora	Plata y oro	Explotación a tajo abierto, trituración, lixiviación en pilas y <i>Merril – Crowe</i>	48 824 ⁵⁶

Fuente: elaboración propia en base a Minera Real de Ángeles (2011, pp. 29 y 30), Minera Frisco (2017, p. 36), Minera Saucito (s/f, pp. 1, 2 y V), Minera Agnico Eagle (2007, p. I–2), Agnico Eagle (2017, p. 13), Minera Peñasquito (2011, p. 6), Minera Peñasquito (2008, p. 2), Goldcorp (2018, pp. 1–14), La jornada (2018), Minera Penmont (s/f, p. 5) y Peñoles (2018, p. 42).

La generación de impactos ambientales en las distintas etapas de los procesos mineros no significa necesariamente que las empresas no cumplen con la legislación ambiental. De hecho, muchas de ellas han sido certificadas por la PROFEPA. Sin embargo, la normatividad se encuentra desfasada o no acompasa los nuevos desarrollos tecnológicos. Existen tecnologías menos contaminantes en el mercado, no obstante, sólo una legislación más estricta obligaría a las empresas a adquirirlas. Sin contar que muchos impactos son difíciles de eliminar en su totalidad debido al aumento en las dimensiones de explotación y procesamiento de minerales.

⁵⁵ Este cálculo se elaboró considerando 365 días laborales y una producción total anual de 2 753 876 ton

⁵⁶ Este cálculo se elaboró considerando 365 días laborales y una producción total anual de 17 820 817 ton

Una empresa dedicada a la extracción de metales preciosos y no ferrosos tarda en establecer una mina de 5 a 20 años después de que inicia la exploración o búsqueda de yacimientos en una determinada zona (Haldar, 2013, p. 2). La exploración es la etapa más importante en el establecimiento de una mina. Actualmente, las empresas mineras sólo contemplan la explotación de yacimientos que tengan por lo menos una vida útil de diez años. El producto final de un proceso de exploración es un reporte que contiene detalles de los recursos minerales detectados en una zona específica. Se tienen estimaciones que de diez lugares que se exploran inicialmente, sólo uno pasa a la etapa adelantada, y de diez en etapa adelantada, sólo uno pasa a etapa de barrenación o perforación de la roca para extraer muestras minerales (Piñeiro, 2019).

Las fases inmersas dentro del proceso de exploración inician con la prospección regional, pasando por la prospección de seguimientos hasta llegar a la barrenación en malla. En esta última fase se perfora la roca para obtener muestras y determinar el tipo de yacimiento y su distribución espacial, las concentraciones de los metales, la caracterización de los minerales, la existencia de alteraciones o “elementos castigo” y los costos de extracción (Piñeiro, 2019).⁵⁷ En conclusión, en el proceso de exploración se estima si existe factibilidad técnica y económica para la explotación de un determinado yacimiento. La estimación de reservas es una de las actividades más complicadas en este proceso, dado que los yacimientos no son cuerpos homogéneos y la concentración de metales es irregular (Parga Pérez, 2018).

Dentro de las interacciones ambientales que conlleva esta etapa se encuentra la remoción de vegetación y suelo, el desplazamiento de fauna, la afectación del lecho rocoso debido a la extracción de muestras rocosas a través de perforaciones (mejor conocidas como barrenos) para su posterior análisis, la emisión de ruido y de gases de combustión procedentes del uso de maquinaria y equipo (Minera Media Luna, 2011, pp. 23, 141 y 142). En algunas ocasiones, la exploración requiere de la construcción de caminos de acceso para transportar la maquinaria y equipo, lo que conlleva a afectar ecosistemas. Este impacto se

⁵⁷ Se denominan elementos castigo a todos aquellos elementos presentes en la producción propios de los yacimientos que disminuyen los costos de venta como el arsénico o el mercurio.

vuelve más significativo en la medida en que se atraviesan zonas ecológicamente sensibles (ELAW, 2010, p. 4). En general, estas interacciones en el ambiente no son significativas si se comparan con las de las siguientes etapas.

Una vez que termina la etapa de exploración, continua la etapa de preparación del sitio para construir la infraestructura necesaria (oficinas, laboratorios, patios de lixiviación, etcétera), para iniciar la explotación del mineral y su procesamiento. El hecho de decir que termina la etapa de exploración es relativo, pues en la realidad, la exploración y la explotación son actividades que siempre están presentes durante la operación de una mina. No puede existir una sin la otra.

Los impactos ambientales desarrollados en la preparación del sitio pueden incluir la remoción de flora, fauna, suelo y material rocoso sin valor, la afectación de corrientes superficiales de agua, la modificación de la topografía y la emisión de polvos de gases de combustión derivados del uso de la maquinaria y equipo. Esta etapa es una de las más agresivas para el ambiente, por lo que las empresas mineras programan desmontes (remoción de flora) y despalmes (remoción de suelo) paulatinos.

Los efectos más directos en la vida silvestre son la destrucción o desplazamiento de especies en áreas excavadas y en los depósitos de desechos mineros. Las especies silvestres terrestres móviles tales como los animales de caza, aves y predadores deben dejar estas áreas. Muchos animales con menor capacidad de moverse tales como invertebrados, reptiles y vertebrados pequeños son los más severamente afectados (ELAW, 2010, p. 15).

La cantidad y variedad de especies vivas removidas depende del tipo de ecosistema presente y de la extensión concesionada. Así, por ejemplo, en la manifestación de impacto ambiental de Minera Peñasquito de septiembre de 2006, se menciona que la infraestructura de esta empresa va a ocupar un área de 1 820.68 hectáreas, de las cuales 193.46 ya han sido afectadas por actividades antropogénicas anteriores y 1 627.2 serán desmontadas por poseer aún vegetación natural (Minera Peñasquito, 2006, p. II-67). El cuadro siguiente muestra los tipos de asociaciones vegetales presentes en el lugar.

Cuadro 43 Vegetación removida en el proyecto minero Peñasquito

Asociaciones vegetales identificadas	Especies dominantes por asociación	Número de individuos	Índice de dominancia
Ocotillo - lechuguilla	Lechuguilla (<i>Agave lechuguilla</i>)	553	61.12 %
	Cenizo (<i>Leucophyllum griseus</i>)	131	
	Total de individuos	1 119	
Palma samandoca – lechuguilla	Sangre de grado (<i>Jatropha dioica</i>)	1 592	17.03 %
	Gobernadora (<i>Larrea tridentata</i>)	1 878	
	Total de individuos	20 366	
Palma china - gobernadora	Nopal rastrero (<i>Opuntia rastrera</i>)	1 143	32.27 %
	Lechuguilla (<i>Agave lechuguilla</i>)	2 825	
	Total de individuos	12 295	
Vegetación riparia	Gobernadora (<i>Larrea tridentata</i>)	75	24.41 %
	Jarilla (<i>Gimnosperma glutinosum</i>)	91	
	Total de individuos	680	
Pastizal inducido	Gobernadora (<i>Larrea tridentata</i>)	67	35.06 %
	Nopal rastrero (<i>Opuntia rastrera</i>)	135	
	Total de individuos	576	
Agricultura de temporal	Gobernadora (<i>Larrea tridentata</i>)	116	39.38 %
	Cascajera (<i>Mentzelia saxicola</i>)	190	
	Total de individuos	777	

Fuente: elaboración propia con base en Minera Peñasquito (2006, p. IV–135 y IV–136, IV137-IV–142).

También en esta misma manifestación se menciona que se identificaron las siguientes especies en estatus de protección Biznaga cabuche (*Ferocactus pilosus* = *Ferocactus stainesi*), Biznaga burra (*Echinocactus platyacanthus*), Biznaga del rincón (*Thelocactus rinconensis*), Chaute (*Ariocarpus retusus*), Peyote (*Lophophora williamsii*) y Pino piñonero pinceana (*Pinus pinceana*) (Minera Peñasquito, 2006, p. IV-153-IV–155). Aunque no se menciona el número de individuos que se pretendía remover en su momento. Aunado a la remoción de flora, se menciona que se tiene programado despaldar 1 851 370 m³ que corresponden a un corte de diez centímetros de suelos de origen aluvial, de profundidad mediana a profunda (de 25 a más de 50 centímetros) y de textura franca a franca arenosa (Minera Peñasquito, 2006, p. IV–69).

Después de la preparación del sitio continua la explotación del mineral. En esta etapa, el mineral puede ser extraído del lecho rocoso a través de varios métodos de minado, los más usuales son los subterráneos y los superficiales. La elección del mejor método de extracción depende de varios factores, entre los más importantes se encuentran la geología

estructural del lugar y la mecánica de rocas, el objetivo fundamental es la construcción de una obra minera estable (López Aburto, 1994, pp. 1 y 6). El desarrollo de la mecánica de rocas ha permitido que la explotación del mineral se realice sobre la roca de mejor calidad, no importando la geometría del yacimiento. Con esta acción, las empresas mineras disminuyen los costos de soporte en las minas subterráneas y, con ello, los costos de operación.

Pese a todos los avances tecnológicos que se han desarrollado para explotar el mineral, esta etapa no deja de ser otra de las más dañinas para el ambiente dadas las afectaciones constantes que se realizan en la hidrología superficial y subterránea del lugar, ocasionando con ello, una degradación ambiental que se agrava constantemente conforme avanzan las operaciones mineras.

Gran parte de los minerales son extraídos mediante explosivos. El uso de estos productos en la minería data de 1627, la pólvora negra fue el primer explosivo que se utilizó durante el periodo de 1627 a 1865. Posteriormente Alfred Nobel inventó la dinamita y las dinamitas gelatinosas durante los años 1865-1866. Estos productos a base de nitroglicerina se popularizaron en la minería hasta la invención del ANFO durante los años cincuenta, un producto de menor valor económico que la dinamita. Sin embargo, su uso ineficiente en presencia de agua, propicio el desarrollo de las suspensiones o hidrogeles durante las décadas sesenta y setenta, y de las emulsiones a finales de los años 70 (Konya & Walter, 1991, p. 2). El hecho de que se sustituyera el diésel por aceite mineral en las emulsiones, dio como resultado un producto más resistente al agua. En la actualidad, el desarrollo de nuevos explosivos continúa, la tendencia es buscar productos que una vez que detonen emitan menos contaminantes a la atmósfera, como el Super Mexamon D (Austin Powder, 2018), un producto a base de virutas de aserrín en una mezcla de ácido nítrico.

Durante las voladuras o detonaciones de rocas se realizan perforaciones (llamadas barrenos) en varios puntos del macizo rocoso sobre una plantilla prediseñada, luego, se cargan los explosivos en distintos barrenos y se formula una secuencia de detonación de los mismos (Castillo, 2017). Los explosivos cuando detonan liberan energía útil y de desperdicio. La energía útil puede ser de choque y de gas, dependiendo del tipo de explosivo

que se utilice, la primera es utilizada para desplazar y fracturar la roca, y la segunda para agrietarla. En una voladura se eligen diferentes cantidades de altos y bajos explosivos, según las proporciones de energía útil que se desee producir. Los altos explosivos generan una mayor proporción de energía de choque que de energía de gas de menor presión, en tanto que, los bajos explosivos se queman rápidamente y no producen energía de choque (Konya & Walter, 1991, pp. 3 y 4). Por último, la energía de desperdicio se manifiesta como sismicidad en el terreno, sobrepresión de aire, y luz y calor (Castillo, 2017).

Las nuevas técnicas de la detonación permiten no sólo golpear y fracturar la roca para explotarla, sino también permiten manejar la energía de esta reacción para establecer el tamaño de la roca requerido, y el lugar de desplazamiento de la misma. La planeación adecuada de una detonación permite que no se arrastren costos económicos extras a otras etapas del proceso, por ejemplo, una mala detonación puede generar fragmentos de roca grandes, los cuales tienen que volverse a fracturar para que puedan ingresar al circuito de la molienda (Dyno Nobel, 2019).

Los principales componentes de los explosivos son los combustibles y los oxidantes, no obstante, es factible que se adicionen otros elementos para mejorar sus propiedades, como el aluminio, que eleva la temperatura de los gases y, con ello, la presión de detonación (Konya & Walter, 1991, p. 6). Además de la liberación de energía, la detonación de un explosivo libera gases tóxicos y no tóxicos producto de las reacciones químicas (International Society of Explosives Engineers, 2007, p. 29).

En una detonación ideal, el carbono contenido en los explosivos da lugar al bióxido de carbono (CO_2), el hidrógeno al agua (H_2O), y el nitrógeno al nitrógeno gaseoso (N_2) (Konya & Walter, 1991, p. 8). Sin embargo, en toda reacción química siempre existe la posibilidad que se generen subproductos no deseados, en el caso de una detonación pueden generarse gases tóxicos como el amoníaco (NH_3), el monóxido de carbono (CO), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el óxido nítrico (NO), el bióxido de nitrógeno (NO_2) y el bióxido de azufre (SO_2) (International Society of Explosives Engineers, 2007, p. 658).

Además de la emisión de gases durante una detonación, también pueden generarse sobrepresiones y vibraciones, y emitirse polvos y otras sustancias sólidas contenidas en los propios explosivos.

Las vibraciones pueden estar asociadas con muchos tipos de equipos usados en las operaciones mineras pero las voladuras son consideradas como la fuente principal. La vibración ha afectado la estabilidad de infraestructuras, edificios y casas de la gente que vive cerca de un tajo abierto (ELAW, 2010, p. 15).

Dentro de los factores que aumentan la generación de gases tóxicos se encuentran formulaciones deficientes del producto, cebado inadecuado, poca resistencia del explosivo al agua, falta de confinamiento, una reacción química incompleta y afinidad química entre la roca y el explosivo (International Society of Explosives Engineers, 2007, p. 44). El cuadro siguiente muestra la cantidad de explosivos utilizada por algunas empresas mineras, según información de manifestaciones de impacto ambiental.

Cuadro 44 Cantidad de explosivos utilizados por algunas empresas mineras según información de manifestaciones de impacto ambiental

Empresa	Ubicación	Metales extraídos	Explosivos utilizados mensualmente (kg)	Mineral procesado 2017 (t/d)
Minera Real de Ángeles Unidad "El Coronel"	Ojocaliente, Zacatecas	Plata y oro	435 896	50 000
Minera Saucito Proyecto "Minera Saucito"	Fresnillo, Zacatecas	Plomo, zinc, plata y oro	93 530	7 545
Minera Peñasquito "Proyecto Minero Peñasquito"	Mazapil, Zacatecas	Plata, oro, zinc y plomo	2 433 333	149 000
Minera Penmont "Proyecto Noche Buena"	Caborca, Sonora	Plata y oro	428 850	48 824

Fuente: elaboración propia en base a Minera Real de Ángeles (2011, p. 89), Minera Saucito (s/f, p. 7), Minera Peñasquito (2008, p. 135) y Minera Penmont (s/f, p. 30).

Cuando el mineral es explotado se obtienen rocas con contenidos metálicos y rocas de deshecho, estas últimas son normalmente depositadas en las mismas instalaciones de las empresas en lugares llamados "tepetateras". Las rocas mineras sin valores al igual que otros residuos de la minería pueden contener minerales sulfurados como los sulfuros de fierro (los más comunes), los cuales se pueden oxidar en presencia de agua y aire. El drenaje

ácido formado es un líquido capaz de disolver los metales pesados presentes en las rocas, generando con ello, contaminación en suelos y aguas (Akcil & Koldas, 2006, p. 1140).⁵⁸

Las rocas con minerales metálicos son procesadas para concentrar los metales a través de métodos hidrometalúrgicos.⁵⁹ Según Habashi, durante los últimos años, los métodos hidrometalúrgicos se han enfrentado a diversos retos entre los que se encuentran el procesamiento de rocas con concentraciones de metales cada vez más bajas, el procesamiento de minerales de complejidad cada vez mayor, el aumento de la demanda de los metales, la producción de metales con mayor pureza, la conservación de los recursos naturales, la disminución de la contaminación ambiental, la reducción del gasto energético, y el desarrollo de procesos cada vez más automatizados (Habashi, 1992, p. 17). También, se pudieran adicionar los diversos conflictos que enfrentan las empresas mineras con las comunidades y trabajadores por sus impactos en el ambiente y la salud.

Antes de que las rocas sean ingresadas a los procesos hidrometalúrgicos son trituradas y molidas. En la lixiviación en pilas, las rocas normalmente sólo se trituran, en tanto que, en los procesos de flotación, las rocas son trituradas y molidas. Los circuitos de trituración y de molienda inician el proceso de liberación de los minerales contenidos en las rocas, aumentan el área superficial y la reactividad, y facilitan el transporte del mineral entre las distintas operaciones (Han & Fuerstenau, 2009, p. 4). Dentro de la maquinaria y equipo que se pueden utilizar en estos circuitos, se encuentran quebradoras de quijada, bandas transportadoras, quebradoras de cono, cribas, molinos de bolas y molinos semi autógenos (SAG).

Los procesos de fragmentación del mineral destinado a la flotación en Minera Peñasquito, inician con la trituración del material rocoso procedente de la mina a 7 plg de diámetro en una quebradora primaria. En seguida, este material ingresa a dos circuitos de molienda, cada uno de los cuales posee un molino tipo SAG con una capacidad de molienda

⁵⁸ El drenaje ácido es el “lixiviado, efluente o drenaje contaminante que ha sido afectado por la oxidación natural de minerales sulfurosos contenidos en rocas o residuos expuestos al aire, agua y/o microorganismos promotores de la oxidación de sulfuros” (DOF, 2011).

⁵⁹ La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia que se encarga de extraer metales utilizando métodos acuosos (Habashi, 2012, p. 54).

conjunta de hasta 130 000 toneladas de mineral por día (Minera Peñasquito, 2019). La fotografía siguiente muestra uno de los circuitos de molienda en Minera Peñasquito.

Figura 6 Fotografía panorámica de un circuito de molienda en Minera Peñasquito



Fuente: propia, fotografía tomada en Minera Peñasquito ubicada en Mazapil, Zacatecas, el 8 de agosto de 2019.

El mineral que entra a estos molinos con bolas de acero, se muele con agua y se reduce a $\frac{3}{4}$ plg de diámetro, luego, este es seleccionado a través de una criba rotatoria que deja pasar las partículas que poseen un diámetro menor a $\frac{3}{4}$ de plg. El material ya seleccionado se deposita en un cárcamo en forma de pulpa. Esta pulpa tiene una concentración de 75 a 78 % en peso de sólidos sobre una base acuosa. Luego este material es bombeado a dos torres de ciclones, las cuales separan las partículas de 150 μm (micras) que serán enviadas al proceso de flotación. Las partículas que no cumplen con esta medida son enviadas a los molinos de bolas, que suman un total de cuatro, dos en cada circuito. Las cuales se remuelen y se vuelven a depositar en el cárcamo que suministra a las dos torres de ciclones, para continuar con el ciclo de selección (Minera Peñasquito, 2019). La fotografía siguiente muestra el sistema de bandas transportadoras de mineral.

Figura 7 Fotografía de bandas transportadoras de mineral entre los circuitos de trituración y molienda



Fuente: propia, fotografía tomada en Minera Peñasquito ubicada en Mazapil, Zacatecas, el 8 de agosto de 2019.

Los fragmentos de mineral con un diámetro superior a $\frac{3}{4}$ de plg que no fueron seleccionados por las cribas rotatorias localizadas después de los molinos SAG, son enviados nuevamente por bandas a un circuito de trituración, para ser cribados, limpiados y triturados por quebradoras, para luego ser molidos por un molino de alta presión. Las partículas resultantes de este circuito, son regresadas nuevamente al cárcamo que alimenta a las torres ciclón. El tratamiento que se les da a los núcleos de rocas o guijarros (10 % del total que ingresa al circuito de molienda) es similar a este (Minera Peñasquito, 2019).

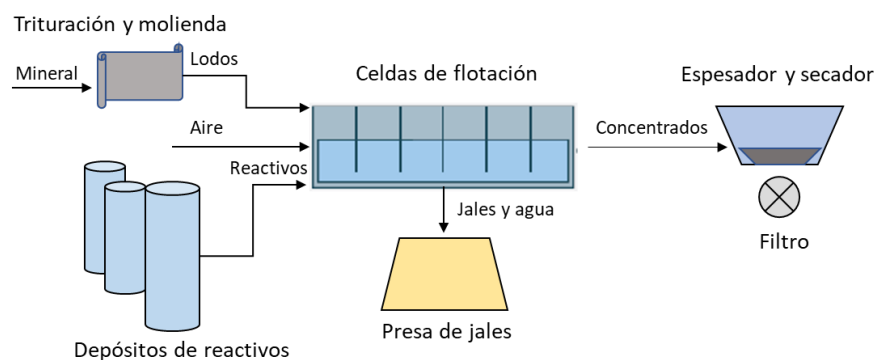
Como se puede observar, el diámetro de las partículas de mineral que ingresan al proceso de flotación ($150 \mu\text{m}$ o menos) es aproximadamente el doble del diámetro de un cabello humano ($60 - 80 \mu\text{m}$). No es un tamaño aleatorio, es el resultado de una serie de pruebas de laboratorio, que predicen el tamaño de roca más adecuado para extraer los metales presentes. Es importante hacer notar que, a menor diámetro de partícula, mayor es el consumo energético de un circuito de trituración y molienda.

El consumo de agua es un impacto ambiental que se da en casi todas las etapas del proceso minero incluyendo a la molienda, precisamente es en esta etapa donde se inicia a mezclar el mineral con este vital líquido. Además, desde el punto de vista ambiental esta

etapa es importante, dado que inicia la liberación de metales pesados, que por milenios permanecieron aislados de los seres vivos. Después de este proceso, los metales pesados tienen mayores posibilidades de incorporarse a las cadenas tróficas.

Después de que las rocas han sido trituradas y molidas, ingresan al proceso de flotación selectiva, el cual tiene por objetivo concentrar los minerales de sulfuro como la galena (mineral de plomo), la pirita (mineral de hierro), los sulfuros de cobre y la esfalerita (mineral de zinc). Se desarrolla en fase acuosa aprovechando las propiedades superficiales de los minerales como su composición y su carga eléctrica (Han & Fuerstenau, 2009, p. 4). La figura siguiente muestra un diagrama de un proceso de flotación de manera simplificada.

Figura 8 Diagrama de un proceso de flotación



Fuente: elaboración propia.

Los procesos de flotación selectiva objeto de investigación de la presente tesis, son continuos y normalmente se componen de dos circuitos, uno para el plomo (más el cobre en algunos casos) y otro para el zinc. Cada uno de los cuales se compone de bancos con celdas a través de las cuales circula una solución acuosa con partículas de mineral en una proporción alrededor del 26 % en peso, así como, reactivos orgánicos e inorgánicos que facilitan la separación de los minerales de interés. El pH de esta solución es continuamente controlado mediante la adición de sustancias como carbonato de sodio, hidróxido de calcio, hidróxido de sodio, amoníaco, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico (Fuerstenau & Somasundaran, 2009, p. 259). Dentro de los reactivos que se adicionan al proceso se encuentran depresores, colectores, espumantes, extendedores, activadores, desactivadores, dispersantes y floculantes (Fuerstenau & Somasundaran, 2009, p. 252).

Los depresores son las primeras sustancias que se adicionan al proceso, son compuestos orgánicos o inorgánicos que deprimen la recuperación de ciertos minerales y, por lo tanto, acrecientan la recuperación de otros (A. Gupta & Yan, 2006, p. 557). Por ejemplo, en el circuito de plomo – cobre no es deseable que flote la esfalerita o la pirita, minerales con contenido de zinc y fierro respectivamente, por lo que se adiciona cianuro de sodio y sulfato de zinc para impedir que estos minerales se separen de la solución. Los colectores son sustancias orgánicas que hacen que las superficies de los minerales adquieran un carácter hidrofóbico. Esta nueva propiedad les permite repeler el agua y adherirse a burbujas de aire que se dispersan a través de las celdas y, se dirigen hacia la superficie donde se tiene una zona de espuma que recolecta el concentrado. Los espumantes se adicionan para reducir la tensión superficial del agua y estabilizar las burbujas de aire (A. Gupta & Yan, 2006, p. 557).

Los extendedores son sustancias no iónicas y no polares que incrementan la hidrofobicidad de los minerales de interés. Los activadores son reactivos especiales que activan la adsorción de colectores en minerales de interés. Por ejemplo, una vez que es removido el plomo y el cobre en el primer circuito, es necesario adicionar sulfato de cobre en el segundo circuito para activar la esfalerita y recuperar el zinc (Fuerstenau & Somasundaran, 2009, p. 257). Los desactivadores son sustancias químicas que sólo se adicionan al proceso de flotación cuando es necesario, su función es formar compuestos inertes con los activadores, evitando así que ciertos minerales activados no floten. Los dispersantes y floculantes también se pueden adicionar ocasionalmente a la solución del proceso cuando se requiere eliminar el exceso de partículas finas llamadas limos, las cuales incrementan el consumo de reactivos (Fuerstenau & Somasundaran, 2009, p. 259). La dosificación de sustancias químicas varía de proceso a proceso, depende en gran medida de la naturaleza de los minerales presentes y las concentraciones de los metales.

Luego que los concentrados son obtenidos, estos son filtrados y secados mediante filtros especializados que comprimen e inyectan aire. Habitualmente, los concentrados quedan con menos de un 12 % de humedad. Posteriormente, los concentrados son transportados en góndolas para su venta o envío a plantas fundidoras. Actualmente, los

concentrados de cobre son vendidos a China en los puertos del pacífico, y los concentrados de plomo y zinc son enviados a plantas fundidoras.

Los circuitos de flotación descargan las soluciones de proceso (agua, reactivos y jales) a un tanque espesador donde se adicionan dispersantes y floculantes para eliminar el exceso de partículas finas y poder volver a reutilizar esta solución. Por la diferencia de pesos, la solución de proceso tiende a depositarse en la parte superior del tanque, y los jales o partículas de roca procesadas tienden a precipitarse en el fondo. Esto permite reingresar la solución al proceso y, trasladar los jales inmersos en una matriz acuosa con restos de sustancias químicas (aproximadamente 60 % jal – 40 % solución de proceso) a las presas de jales. En estas estructuras todavía se capta una parte del agua de proceso para su recirculación, mientras que otra se pierde por infiltraciones y evaporación. En ocasiones, los jales están siendo utilizados para rellenar excavaciones subterráneas que ya no serán explotadas.

Figura 9 Fotografía de un tanque de recirculación del agua de proceso de flotación selectiva



Fuente: propia, fotografía tomada en la Compañía Minera Sabinas ubicada en Sombrerete, Zacatecas, el 3 de mayo de 2019.

Si bien, gran parte del agua del proceso de flotación es recirculada, las empresas mineras tienen que adicionar un nuevo porcentaje para suplir la demanda de este vital líquido que se pierde por evaporación e infiltraciones. De hecho, este es otro de los impactos ambientales de mayor trascendencia en la minería, muy comentado en los

diferentes medios de comunicación. Una de las preguntas que la sociedad se realiza una vez que se ubica una mina es si las aguas superficiales y subterráneas permanecerán aptas para ser consumidas por los seres humanos, y para preservar las especies acuáticas nativas y la vida silvestre en general (ELAW, 2010, p. 9).

Los jales al igual que las rocas sin valores metálicos son elementos susceptibles de generar drenaje ácido por la presencia de minerales sulfurados como el sulfuro de fierro (pirita).⁶⁰ Además, las presas de jales por su extensión pueden contribuir a disminuir los servicios ambientales como la provisión del agua en cantidad y calidad, la captura de carbono y otros contaminantes, la regulación climática, y la protección de la biodiversidad y de los ecosistemas.⁶¹

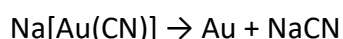
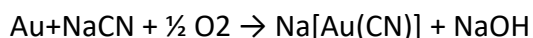
También, al igual que en otras etapas del proceso minero, es factible que durante los procesos de flotación y disposición de jales se genere ruido, GEI y polvos o materia particulada (PM por sus siglas en inglés). Este último fenómeno es muy común sobre todo antes de que las presas de jales sean remediadas. Los GEI pueden generarse de manera indirecta por el uso de la electricidad y de manera directa por el uso combustibles.

El oro es uno de los metales más raros en la corteza terrestre, frecuentemente se presenta en la naturaleza como oro nativo, con una concentración de 90 % o más de este metal, comúnmente acompañado de la plata. También se presenta en forma de aleaciones con la plata o en minerales en concentraciones que van de los 30 gramos hasta menos de un gramo por tonelada (Kongolo & Mwema, 1998, p. 281). Con el afán de obtener un mayor beneficio económico de los minerales con bajas concentraciones de oro, las empresas mineras utilizan técnicas hidrometalúrgicas de lixiviación. La forma más simple de estas técnicas es la llamada lixiviación “*in situ*” que consiste en la perforación de orificios sobre la roca mineral, a través de los cuales se introducen tubos perforados que distribuyen la solución lixivante, para disolver algunos metales de interés. Luego esta solución es

⁶⁰ La reacción general del proceso de oxidación de la pirita puede ser representada por: $\text{FeS}_2 + 15/2\text{O}_2 + 7/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$ (Kefeni et al., 2017, p. 476).

⁶¹ Los servicios ambientales son “los beneficios tangibles e intangibles, generados por los ecosistemas, necesarios para la supervivencia del sistema natural y biológico en su conjunto, y para que proporcionen beneficios al ser humano” (DOF, 2017).

recuperada a través de una bomba colocada en un orificio central para su posterior procesamiento (Habashi, 1992, p. 18). Actualmente la lixiviación es utilizada para extraer óxidos de cobre con una solución lixivante de ácido sulfúrico, minerales de oro y plata con una solución alcalina de cianuro, y sulfuros de cobre secundarios con una solución oxidativa de ácido sulfúrico (Petersen, 2016, p. 207). En el caso del oro, la reacción química que describe este proceso se menciona a continuación.



(Korte & Coulston, 1995, p. 99)

La Minera Real de Ángeles, unidad “El Coronel”, ubicada en el municipio de Ojocaliente, Zacatecas, al igual que otras empresas, ha optado por desarrollar la lixiviación en pilas o en montones. Una técnica que consiste en triturar y mezclar el mineral con óxido de calcio (CaO) para luego enviarlo a los patios de lixiviación, los cuales han sido previamente impermeabilizados con geomembranas. En los patios, el mineral es acomodado en pilas secuenciales de 6 metros de altura, cada una de las cuales es regada por goteo con solución lixivante de cianuro de sodio durante algunas semanas antes de colocar la siguiente cama. Habitualmente, este proceso se realiza hasta alcanzar una altura de 10 camas o 60 metros de altura. La concentración del cianuro de sodio en la solución de riego es determinada por pruebas metalúrgicas desarrolladas en el laboratorio. Básicamente lo que se busca es que el ion cianuro (CN⁻) producto de la disolución del cianuro de sodio forme complejos con el oro y la plata a un pH de 10.5 a 11, los cuales permanecerán disueltos en la misma solución. Posteriormente esta solución rica en metales, es recopilada a través de canales y trasladada al siguiente proceso (Minera Real de Ángeles, 2005, pp. 15 y 16, 2011, pp. 29, 30, 44 y 55). La fotografía siguiente muestra las pilas de lixiviación de la Minera Real de Ángeles, proyecto “El Coronel”.

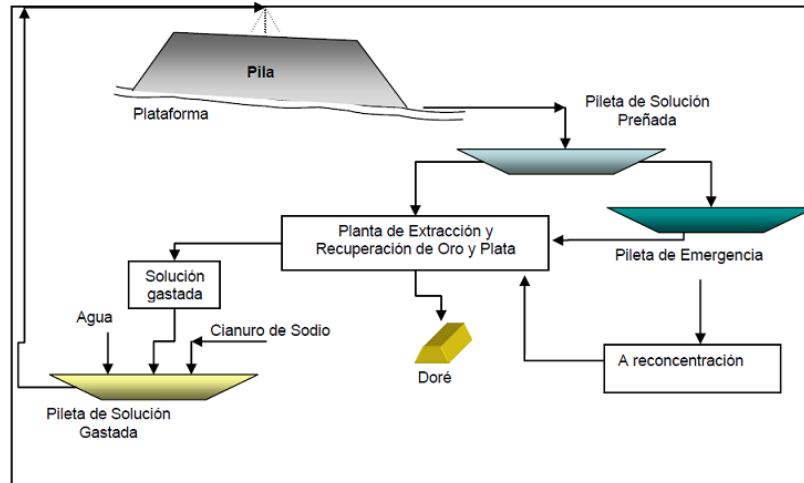
Figura 10 Fotografía que muestra el desarrollo del proceso de lixiviación



Fuente: propia, fotografía tomada en la Minera Real de Ángeles, proyecto “El Coronel”, el 17 de octubre de 2017.

En Minera Peñasquito también se desarrolla la lixiviación en pilas, aquí el riego por goteo se realiza con una solución de cianuro de sodio con una concentración de 600 a 850 ppm (mg/l) (2019). Actualmente esta empresa trata minerales por esta técnica con concentraciones de oro de 0.21 y de plata de 25.9 g/t (Goldcorp, 2018, pp. 1–9). En general, las tasas típicas de riego para lixiviar por montones son del orden de 5 a 20 l/m²/h, normalmente la irrigación es continua, aunque es posible adoptar periodos intermitentes (Petersen, 2016, p. 207). El siguiente diagrama muestra un esquema de lo que sería un proceso de lixiviación en pilas.

Figura 11 Diagrama de un proceso de lixiviación por pilas



Fuente: NOM-155-SEMARNAT-2007 (DOF, 2010).

A diferencia de la lixiviación en pilas, la lixiviación dinámica se caracteriza porque el mineral no sólo se tritura, también se llega a moler a menos de 1 mm de diámetro y se mezcla con agua antes de ser enviado a una serie de tanques, donde ocurrirá el proceso de lixiviación. Estos tanques se encuentran equipados con agitadores e inyectores de aire comprimido para optimizar el proceso de disolución del oro y la plata (Minera Agnico Eagle, 2007, p. II-64). Este tipo de lixiviación es utilizada cuando los minerales a tratar, poseen cantidades significativas de metales preciosos.

El uso del cianuro en los procesos mineros ha sido objeto de grandes discusiones sobre todo si se habla de lixiviación en pilas. Si bien éste puede ser destruido y recuperado, su toxicidad e impactos en el ambiente no dejan de ser preocupantes (Akcil, 2003, p. 501). Korte y Coulson mencionan que, para procesar 250 000 toneladas de mineral con una concentración de oro de 1 a 10 ppm (g/t), se requieren 122.5 toneladas de cianuro de sodio, 70 371 m³ de agua y 1.56 hectáreas para depositar los residuos. Asimismo, se estima que se liberan a la atmósfera 22 toneladas de ácido cianhídrico HCN sobre la cantidad de cianuro de sodio antes mencionada, con un tiempo de vida medio de 267 días (1995, p. 99).

El cianuro no sólo forma complejos con el oro y la plata, también reacciona con otros elementos presentes en los minerales generando una variedad de compuestos relacionados

con el cianuro. Por lo tanto, una empresa minera que utiliza cianuro de sodio, puede generar en su proceso: cianuro libre representado por el cianuro de hidrógeno (HCN) y el anión cianuro (CN⁻), complejos formados por cianuro y metales como el zinc, el níquel, el cadmio, el cobre, el fierro, el cobalto, etcétera, y otros compuestos oxidados como el amoníaco, el cianato (OCN⁻) y el tiocianato (SCN⁻) (Müezzinoğlu, 2003, p. 54). Estos compuestos se asocian con diferentes toxicidades, pero no sólo eso, también se asocian con diferentes reactividades y formas o mecanismos de transporte en el ambiente (Zagury et al., 2004, p. 212). Las especies de cianuro más tóxicas son el cianuro de hidrógeno HCN y el anión cianuro (CN⁻), mientras que los complejos de cianuros son considerados menos tóxicos (Johnson, 2015, p. 196).

Autores como Johnson *et al.*, han hecho hincapié en que no todas las legislaciones ambientales del mundo regulan todos los compuestos relacionados con el cianuro, se da por hecho que los compuestos menos tóxicos no llegarán a tener efectos significativos sobre el ambiente, tal es el caso de los complejos que forma el cianuro con los metales de transición, incluyendo el cadmio, cobre, níquel y zinc. Sin embargo, con el tiempo, estos compuestos menos tóxicos pueden ser foto disociados en cianuro libre, la especie más tóxica (2001).

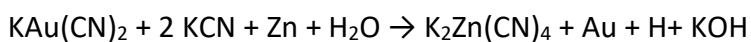
Dentro de los métodos de extracción de minerales, la lixiviación en pilas es de los más dañinos para el ambiente por varias razones. Primero, las zanjas o conductos por donde circulan las soluciones cianuradas representan un peligro inminente para la vida silvestre (MINEO Consortium, 2000, p. 10). Segundo, el uso de soluciones químicas potencialmente tóxicas a gran escala presenta riesgo de fugas en el ambiente a través de grietas en los revestimientos del suelo ubicados debajo de las camas de lixiviación, en los canales de conducción y en los estanques de almacenamiento. Es por ello que los revestimientos de doble capa son cada vez más comunes, no obstante, si se llegase a presentar una fuga bajo las extensas camas de lixiviación sería muy difícil detectarla (Petersen, 2016, p. 211). En general, las fugas y los derrames de cianuro, son los principales eventos de mayor riesgo en los procesos de lixiviación en pilas.

Por último, otra desventaja de este método es que como no es económicamente factible mover tantas toneladas de mineral ya tratado, las empresas mineras han optado por dejarlas en el lugar como una forma de disposición final. Sin embargo, a pesar de que adoptan alguna forma de remediación, estos minerales apilados son susceptibles a la erosión del agua y del viento. Además, los cambios geoquímicos que pudieran desarrollarse a lo largo del tiempo, pueden verse reflejados en la movilidad de los metales pesados.

Because of the large area of land disturbed by mining operations and the large quantities of earthen materials exposed at sites, erosion can be a major concern at hardrock mining sites. Consequently, erosion control must be considered from the beginning of operations through completion of reclamation. Erosion may cause significant loading of sediments (and any entrained chemical pollutants) to nearby waterbodies, especially during severe storm events and high snow melt periods (MINEO Consortium, 2000, p. 12).

El hecho de que, en la lixiviación en pilas, las reacciones químicas se desarrollen en los propios ecosistemas sin que exista un aislamiento de por medio más que la colocación de geomembranas en los lugares de lixiviación, implica que este método sea uno de los más dañinos para el ambiente. Asimismo, la proeza de que este método permita tratar miles de toneladas de mineral con bajas concentraciones de metales preciosos, aumenta los riesgos y los impactos al ambiente.

Después de que se realiza la lixiviación o disolución de los metales preciosos, el objetivo ahora es precipitarlos. Para llevar a cabo esta tarea, algunas empresas mineras han adoptado el proceso denominado *Merrill-Crowe* (o cementación con zinc). De manera concreta el proceso se explica mediante las reacciones siguientes:



(C. K. Gupta & Mukherjee, 1990, p. 224).⁶²

Merrill-Crowe se compone de varias etapas, en la primera, se clarifica y se filtra la solución rica en oro y plata para impedir que la materia suspendida contamine el producto final. En la segunda etapa, la solución clarificada es sometida al vacío para eliminar el

⁶² En estas reacciones se considera el uso de cianuro de potasio (KCN), no obstante, es más común utilizar cianuro de sodio (NaCN). Una situación que no alterara la dinámica de estas reacciones.

oxígeno presente y aumentar la eficiencia del proceso. Posteriormente se adiciona a la solución zinc en polvo, para que reaccione con el cianuro y libere el oro y la plata. Es posible adicionar también acetato o nitrato de plomo, para asegurar una rápida y completa precipitación del oro y de la plata. Finalmente, la solución con minerales preciosos precipitados es filtrada para obtener un precipitado que es enviado a refinación, y la solución restante es recirculada a los patios de lixiviación, después de que se le adiciona nuevamente cianuro de sodio (C. K. Gupta & Mukherjee, 1990, p. 225).

Otras empresas mineras, en vez de utilizar *Merrill-Crowe* optan por mezclar y agitar la solución procedente de la lixiviación con carbón activado, este sólido tiene como función absorber los complejos cianurados de oro y plata. Luego, el carbón activado es separado de la solución a través de un tamiz. No obstante, si se tienen grandes cantidades de plata, este metal es separado antes de la adición del carbón activado con sulfuro de sodio. Una vez que han sido absorbidos los complejos de oro y plata en el carbón activado, este es nuevamente tratado con una solución de cianuro de sodio para volver a disolver los complejos cianurados de oro y de plata, pero con menos impurezas. Posteriormente, esta solución es enviada a la celda de electrodeposición para separar el oro y la plata con pequeñas cantidades de cobre, plomo y mercurio en forma de precipitado, el cual es enviado a refinación más adelante (Kongolo & Mwema, 1998, p. 286).

Los precipitados obtenidos de los procesos *Merrill-Crowe* y electrodeposición pueden ser refinados de manera básica antes de salir de las instalaciones mineras. Minera peñasquito realiza esta operación primeramente en un horno de retorta donde el precipitado es calentado hasta 650°C para sublimar y condensar el mercurio, el cual es recolectado en un tanque para su posterior destino. El precipitado obtenido de esta operación llamado torta es mezclado con fundentes como el litargirio de plomo que disminuyen el punto de fusión de la mezcla. A continuación, esta mezcla es vertida en un horno de crisol donde es fundida para formar las barras de doré, una aleación de oro y plata semi pura hecha en las instalaciones de las minas, las cuales son enviadas a empresas fundidoras que refinan con mayor calidad los metales preciosos. La escoria obtenida durante la fusión se tritura y se criba para recuperar la gravilla esférica aún con oro y plata,

la cual es regresada al horno de fusión, la escoria no útil es dispuesta de acuerdo a los procedimientos establecidos por las empresas mineras (Minera Peñasquito, 2006, p. II-94 y II-95).

El principal impacto ambiental de la refinación básica es la emisión de contaminantes a la atmósfera por el uso de energía eléctrica y el consumo de combustibles como el gas LP y el diésel. Dentro de estos contaminantes se encuentran: el humo, la materia particulada, el monóxido de carbono (CO), el bióxido de carbono (CO₂), el bióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). También, en este proceso se generan escorias que pueden llegar a ser problemáticas si se generan en grandes cantidades.

En la naturaleza existen minerales de oro denominados refractarios que al ser procesados tienen un porcentaje de recuperación muy bajo, menos del 80 % (Yannopoulos, 1991, p. 79). En este tipo de minerales, las partículas finas de oro se encuentran diseminadas y encerradas en minerales sulfurosos como la pirita y la arsenopirita (Badri & Zamankhan, 2013, p. 512). Algunas empresas mineras en México como Fresnillo plc, Minera Saucito y Minera Peñasquito ubicadas en el estado de Zacatecas, con la pretensión de obtener recursos económicos de estos minerales, han iniciado la construcción de plantas de lixiviación de concentrados de pirita para tratar los minerales refractarios presentes en los jales recientes y antiguos (Goldcorp, 2018, pp. 1-6; Peñoles, 2018, p. 13). El cuadro siguiente muestra los porcentajes de recuperación de oro y plata que se pretenden alcanzar en la Minera Peñasquito con la instalación de la planta de lixiviación de pirita. Como puede observarse, se extraerá un 12.8 y un 9 % más de oro y plata respectivamente.

Cuadro 45 Recuperación de metales antes y después de la instalación de la planta de lixiviación de concentrados de pirita

Metal	Recuperación sin planta de lixiviación de concentrados de pirita (%)	Recuperación con planta de lixiviación de concentrados de pirita (%)
Oro	59.5	72.3
Plata	78.6	87.6
Plomo	75.0	75.0
Zinc	79.1	79.1

Fuente: elaboración propia con datos de Goldcorp (2018, pp. 1–6 y 1–7).

El proceso que se desarrolla en las plantas de lixiviación de concentrados de pirita se adecua a las características de los minerales refractarios presentes en los jales. Algunas empresas mineras como Peñasquito, inician este proceso recuperando por flotación los minerales de fierro presentes en los jales del circuito de zinc. Luego, estos concentrados pasan a un proceso de molienda para reducir su tamaño hasta 50 μm de diámetro, las partículas resultantes, son espesadas y nuevamente molidas hasta tener una dimensión de 20 a 25 μm de diámetro. Este nuevo material es ingresado a los tanques de lixiviación, para disolver los metales preciosos en una solución cianurada. Luego, la pulpa lixiviada pasa a un lavado contracorriente, y de ahí la solución rica en valores es enviada al proceso de *Merrill-Crowe*, donde se obtienen un precipitado rico en metales preciosos, el cual puede ser refinado para obtener las barras de doré. Los jales resultantes de este proceso son enviados a las presas de jales, y la solución residual se vuelve a reciclar (Minera Peñasquito, 2019).

En los procesos de lixiviación de piritas, al igual que en otros procesos mineros, es factible la generación de ruido, vibraciones, polvos y GEI, y el consumo de grandes cantidades de agua; además de los riesgos que se corren por el uso del cianuro. Si bien, estos se encuentran más controlados por el hecho de que la lixiviación se realiza en tanques especializados, no dejan de representar un impacto en el ambiente. La fotografía siguiente muestra una vista panorámica de las instalaciones de lixiviación de Peñasquito, donde al fondo se aprecian los tanques de lixiviación de pirita.

Figura 12 Fotografía de los tanques de lixiviación de pirita de Minera Peñasquito



Fuente: propia, fotografía tomada en Minera Peñasquito ubicada en Mazapil, Zacatecas, el 8 de agosto de 2019.

Dado que la adquisición de nuevas tecnologías significa para las empresas mineras una mayor inversión, en ocasiones, éstas se reúsan a los cambios, sobre todo si no van dirigidos a aumentar la ganancia. Las empresas prefieren garantizar la amortización del capital ya instalado, e inclusive aún más extender el periodo de vida útil. Esta barrera económica atenta contra la introducción de tecnologías para prevenir y mitigar los impactos ambientales. También puede ocurrir que no exista personal especializado para operar las nuevas tecnologías, sin embargo, el hecho de no implementarlas limita la capacitación de nueva fuerza de trabajo.

Para fines de análisis, los impactos ambientales más significativos dentro de las operaciones mineras pueden resumirse en los grupos siguientes. El primero de ellos, contempla la destrucción de los ecosistemas debido a varias acciones como el desplazamiento y la afectación de la flora y la fauna del lugar, la remoción del suelo, la extracción y consumo excesivo de agua, la modificación de la topografía, la modificación del paisaje, y la modificación de la hidrología. En relación a este último punto, cuando se establece una mina puede: i) interferir con el movimiento regional de las aguas superficiales y subterráneas; ii) propiciar que las aguas naturales que ingresan a la mina entren en

contacto con los metales pesados; iii) modificar el patrón de recarga de la zona; iv) aumentar la interacción de las aguas superficiales y las subterráneas debido a fenómenos como el hundimiento; v) propiciar la pérdida de las características de los cuerpos de agua superficiales; vi) promover geoquímicamente la movilidad de las sustancias tóxicas; y vii) modificar el balance general del agua en el sitio, por la gran cantidad de agua que se consume durante el desarrollo de las operaciones (MINEO Consortium, 2000, p. 15).

Si bien las empresas mineras pueden tener varias fuentes de abastecimiento de agua como la procedente de las plantas municipales de tratamiento o las subterráneas. Una manera de estimar la cantidad de este líquido que utilizan las empresas, es sumando las cantidades especificadas en los títulos de concesión. Llano, miembro de CartoCrítica, en colaboración con la Fundación Heinrich Böll Stiftung realizó esta estimación para el 2014 y llegó a la conclusión siguiente:⁶³

Finalmente se encontraron 417 empresas mineras dentro del REPDA, que se lograron agrupar en 230 grupos empresariales mineros. Un total de 1,036 títulos de aprovechamiento de agua, amparando un volumen de 436 millones 643 mil 287.92 metros cúbicos anuales de agua es lo que se encontró concesionado a empresas mineras. Esto es el equivalente al volumen de agua necesario para satisfacer el derecho humano al agua por un año de 11 millones 962 mil 830 personas. Cabe recordar que en México, 13.8 millones de personas no tienen acceso al agua en la vivienda (Llano, 2016).

La comparación que hace Llano en la cita anterior es impactante. Casi 437 millones de litros cúbicos de agua concesionados anualmente a las empresas mineras pueden abastecer casi 12 millones de personas en un país donde la gente sin acceso al agua en su vivienda supera los 13 millones. Más allá de la falta de infraestructura de abastecimiento de agua a la población, esta comparación deja entrever sin lugar a dudas que la magnitud del agua requerida por la minería es significativa.

El segundo grupo de impactos ambientales generados por la minería es la gran generación de emisiones gaseosas provenientes del uso de la energía eléctrica y del uso de combustibles fósiles. Estas emisiones pueden provenir de fuentes fijas como los hornos de

⁶³ El autor advierte que no existen datos oficiales sistematizados, y que la investigación requirió engorrosas etapas de identificación individual de empresas, filiales y concesiones (Llano, 2016).

fundición, o de fuentes móviles como los transportes de mineral. El uso de energía eléctrica es una de las principales fuentes de generación de GEI (emisiones indirectas) en la minería. La Comisión Reguladora de Energía público en el año 2017 que por cada MWh (megawatts-hora) utilizado, se emitían 0.582 toneladas de bióxido de carbono por (2017).

La minería a gran escala potencialmente puede contribuir de manera importante a la contaminación del aire, especialmente durante la etapa de operación. Las actividades durante la extracción de mineral, procesamiento, manipulación y transporte dependen del equipo, del tipo de generadores de energía, procesos y materiales que pueden generar contaminantes atmosféricos peligrosos tales como material particulado, metales pesados, monóxido de carbono, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno (ELAW, 2010, p. 13).

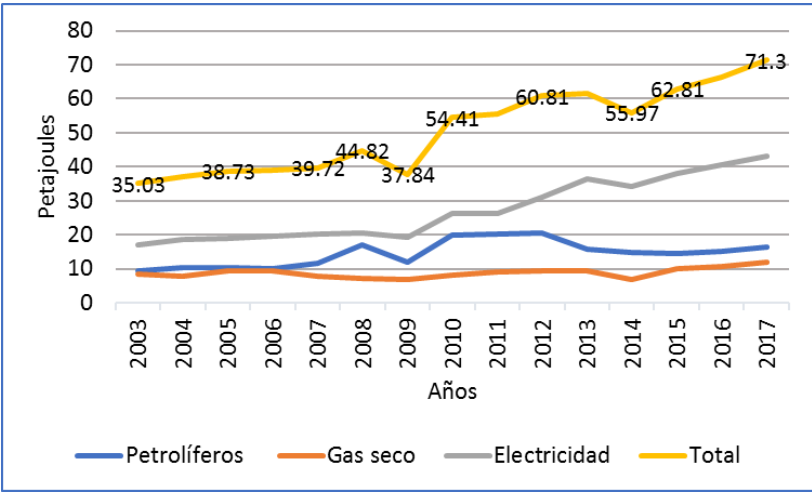
En general, en todos los procesos mineros, la energía eléctrica es uno de los insumos más importantes y de mayor costo. Gran parte de los equipos mineros utilizan grandes cantidades de energía eléctrica, dentro de los que se encuentran aquellos de naturaleza electrohidráulica, y los sistemas de ventilación y bombeo. De hecho, ante el aumento de este insumo, empresas como Peñoles han impulsado el desarrollo de centrales de generación para su consumo.

Debido a nuestra dinámica de crecimiento, la demanda de electricidad ha aumentado significativamente. Así, ha pasado de 152 MW en el año 2000 a 324 MW en 2017; es decir, más del doble, y prevemos que continúe incrementándose para llegar a 477 MW en el año 2020. [...] En abril de 2017 tuvimos un avance importante en esta estrategia con el arranque de Eólica de Coahuila, parque eólico de 199.5 MW de capacidad instalada localizado en el Municipio de General Cepeda, estado de Coahuila. Mediante un contrato de suministro a 25 años celebrado con Electricidad de Portugal Renovables (EDPR), nuestras operaciones comenzaron a abastecerse de la energía limpia generada por este parque a precios competitivos. Otro paso significativo fue la licitación de dos nuevos proyectos: una central de cogeneración eficiente en Coahuila con 60 MW de potencia y un parque eólico en Tamaulipas con 306 MW de capacidad instalada, que entregarán anualmente electricidad por 450 y 1,170 MkwH respectivamente, a partir del inicio de operaciones esperado para el año 2020 (Peñoles, 2018, p. 57).

La Secretaría de Energía (SENER) no ha publicado estadísticas exclusivas del consumo de energía eléctrica por parte de las empresas mineras productoras de metales, generalmente las incluye con las que producen no metales. Sin embargo, es posible obtener algunas conclusiones interesantes derivadas de los datos publicados. De acuerdo con SENER, el consumo total de energía en las empresas mineras, incluyendo aquellas que producen no metales, posee una tendencia al alza. Este parámetro pasó de 35.05 a 71.30 petajoules durante los años 2003 y 2017, es decir, se duplicó en un lapso de catorce años.

La gráfica siguiente muestra que la electricidad es la principal fuente de energía utilizada por las empresas mineras, incluyendo aquellas que producen no metales, seguida por los petrolíferos (gas licuado de petróleo, diésel y combustóleo) y el gas seco. Esta tendencia al alza en el consumo de energía es un indicativo del aumento de la producción de metales y no metales y de la generación de bióxido de carbono, un contaminante ícono de los GEI.

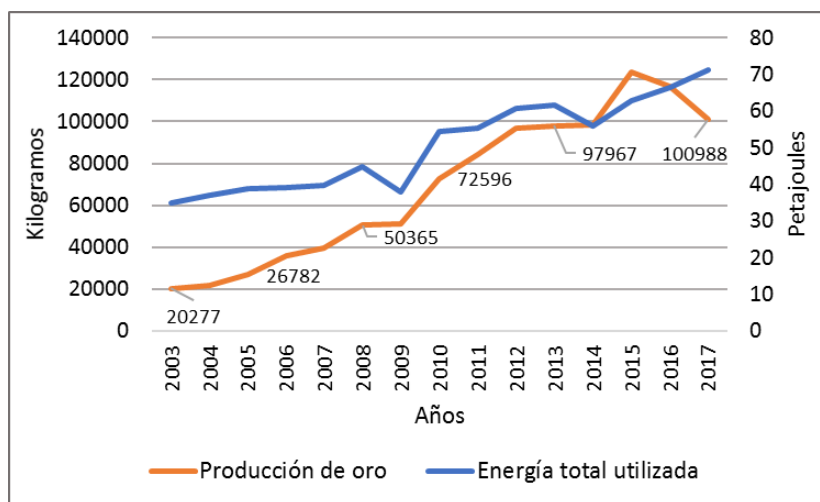
Gráfica 24 Consumo de energía por parte de las empresas mineras, incluyendo aquellas que producen no metales 2003 -2017



Fuente: elaboración propia con base en datos de SENER (2014, p. 104, 2018, p. 96).

Aunque el consumo de energía no es exclusivo de las empresas mineras productoras de oro, al comparar la producción de oro y el consumo de energía eléctrica durante los años 2003 y 2017, se observa que existe una tendencia al alza entre estas dos variables. La gráfica siguiente es un indicativo de esta comparación.

Gráfica 25 Producción de oro y consumo de energía por las empresas mineras, incluyendo aquellas que extraen no metales 2003 – 2017



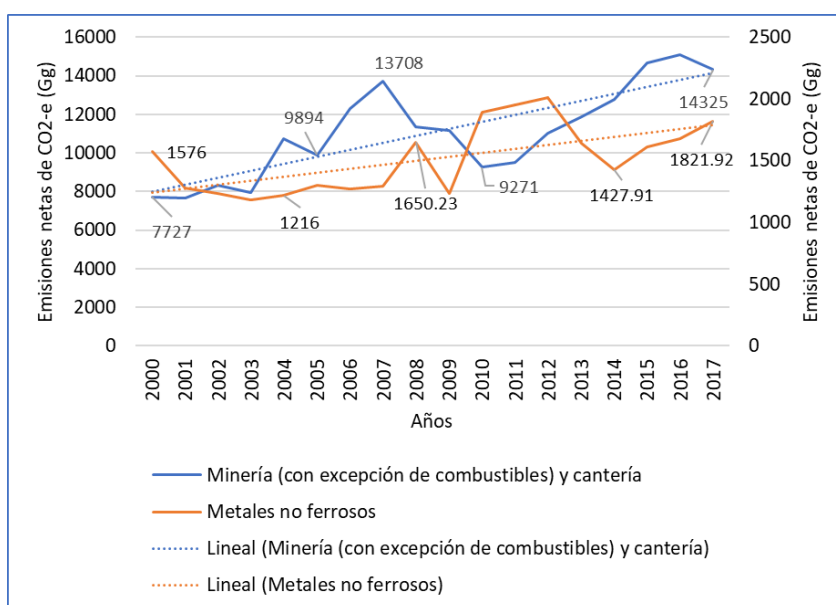
Fuente: elaboración propia con base en datos de SENER (2014, p. 104, 2018, p. 96) e INEGI (2010, 2018).

En cuanto a las emisiones de GEI, las estadísticas del INEGyCEI para el 2017 indicaron que en todo el país se emitieron 733 822.444 Gg (gigagramos) de CO₂-e y 134.071 Gg de carbono negro (INECC, 2018d).⁶⁴ Respecto a la minería, en el inventario no se presentan datos específicos de la cantidad de GEI que emite la minería del oro, de la plata, del plomo, del zinc o del cobre. Por lo que se optó por analizar dos de los conceptos más generales de este inventario denominado “minería (con excepción de combustibles) y cantería” y “metales no ferrosos”. Si bien estos conceptos incluyen no sólo a las empresas mineras objeto de este estudio sino también a muchas otras incluyendo a las canteras, son un ejemplo representativo de lo que ocurre en esta rama industrial. Es importante mencionar que estos conceptos sólo consideran la emisión de GEI por el consumo de combustibles fósiles, no por el consumo de energía eléctrica ni otras fuentes de energía renovables como la energía eólica, dado que se supone que no generan GEI de manera directa (INECC, 2018b, p. 4).

⁶⁴ Un gigagramo (1 x 10⁹ gramos) equivale a un millón de kilogramos, o mil toneladas.

La gráfica siguiente muestra que existe una tendencia al alza en la emisión de CO₂-e para los conceptos analizados durante las dos primeras décadas del siglo XXI. Si bien las emisiones netas de CO₂-e en la minería dependen de varios factores como el tipo de tecnología empleada, un aumento en la producción de metales, trae como consecuencia un aumento en la emisión de GEI. En el apartado siguiente se abordará con mayor detalle las emisiones de GEI por la minería, según información del RETC.

Gráfica 26 Emisiones de CO₂-e en la minería (con excepción de combustibles) y cantería, y en la producción de metales no ferrosos (Gg), periodo 2000-2017

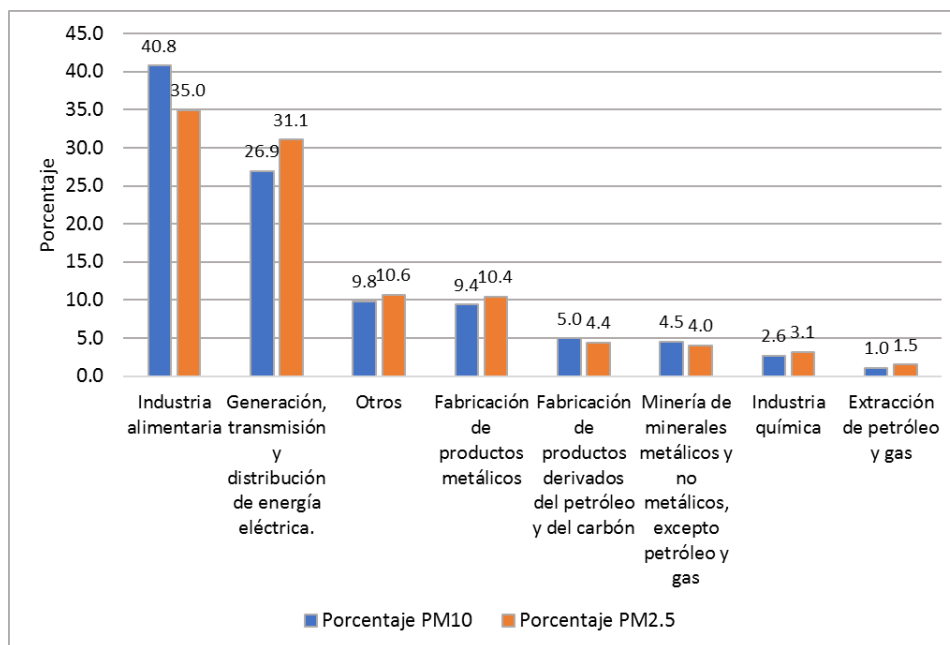


Fuente: elaboración propia con datos del INECC (2018c).

El tercer grupo de impactos ambientales generados por la minería es la emisión de materia particulada. De acuerdo con las estadísticas del Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales (SNIARN) para el 2016, las empresas productoras de metales y no metales ocuparon el quinto lugar en emisiones de materia particulada con diámetros de 10 y 2.5 micrómetros (PM₁₀ y PM_{2.5}), con valores de 4.5 y 4.0 % respectivamente. Estas fueron antecedidas por las empresas de fabricación de alimentos, de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, de fabricación de productos metálicos y de fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón, quienes en

conjunto emitieron el 82 y el 81 % de PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente. La gráfica siguiente muestra la emisión de materia particulada por varios sectores.⁶⁵

Gráfica 27 Emisión de partículas sólidas PM₁₀ y PM_{2.5} por diversos sectores industriales durante el año 2016



Fuente: elaboración propia con datos de SEMARNAT (2019).

En general, en todas las operaciones mineras es muy factible que se emita materia particulada con niveles altos de metales y metaloides como el plomo y el arsénico, que luego pueden acumularse en los suelos, aguas naturales y vegetación, y dispersarse a través del viento (Csavina et al., 2012, p. 62). De hecho, cuando se arriba a una unidad minera de grandes dimensiones como es el caso de Peñasquito, a simple vista se observa que los polvos son uno de los impactos ambientales de mayor trascendencia. Por lo que es común que se esparza agua en el suelo para no superar el límite máximo permisible establecido en

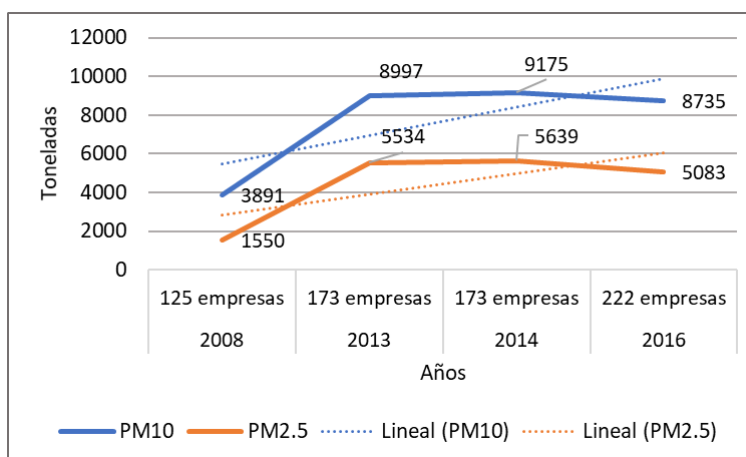
⁶⁵ Las autoridades ambientales obtienen la información sobre materia particulada de la cédula de operación anual (COA), un instrumento de “reporte y recopilación de información de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos peligrosos, empleado para la actualización de la base de datos del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes” (DOF 2014a). En la actualidad también es un instrumento utilizado para la actualización del Registro Nacional de Emisiones.

la legislación. En algunas ocasiones el agua es mezclada con aglomeradores comerciales de polvo, como el llamado “estopol 100”, para minimizar este impacto.

Human health and environmental risks from soils generally fall into two categories: (1) contaminated soil resulting from windblown dust, and (2) soils contaminated from chemical spills and residues. Fugitive dust can pose significant environmental problems at some mines. The inherent toxicity of the dust depends upon the proximity of environmental receptors and type of ore being mined. High levels of arsenic, lead, and radionuclides in windblown dust usually pose the greatest risk (MINEO Consortium, 2000, pp. 19–20).

La gráfica siguiente presenta las emisiones de las empresas mineras productoras de metales y no metales. Como se puede observar, a pesar de que el número de empresas aumenta conforme pasa el tiempo, la emisión de materia particulada tiende a permanecer estable, probablemente este comportamiento obedezca a que las grandes empresas mineras han adoptado sistemas de control y monitoreo de partículas en el ambiente que les permiten minimizar este impacto.

Gráfica 28 Emisión de partículas sólidas PM₁₀ y PM_{2.5} por las empresas mineras, incluyendo aquellas que producen no metales, durante el periodo 2008 – 2016

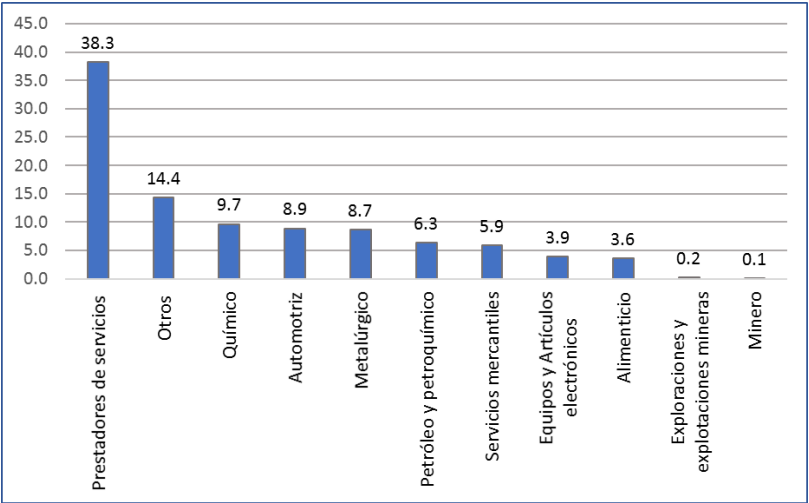


Fuente: elaboración propia con datos de SEMARNAT (2013, 2017, 2018, 2019).

Finalmente, el cuarto grupo de impactos ambientales generados por la minería es la emisión de sustancias químicas al ambiente y la generación de grandes cantidades de jales. En el apartado siguiente se aborda con mayor detalle la emisión de sustancias químicas en la minería según información proporcionada por el RETC. En México no existe un registro público que especifique las cantidades de jales que se producen y sus características de

peligrosidad. Los jales fueron separados de los residuos peligrosos industriales cuando se modificó la NOM-052-SEMARNAT-1993 para dar paso a la NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características de los residuos peligrosos (SEMARNAT, 2008). Bajo este nuevo cambio, la minería dejó de ser un sector representativo en las estadísticas de residuos peligrosos. En la gráfica siguiente se muestra que este sector genera menos del uno por ciento de los residuos peligrosos del país, a diferencia de países como Estados Unidos, donde la EPA ha publicado que el 50 % de las sustancias químicas emitidas al ambiente en ese país corresponden a la minería (EPA, 2019b, p. 3).

Gráfica 29 Generación de residuos peligrosos por sectores durante el periodo de 2004-2014



Fuente: elaboración propia con datos de (SEMARNAT, 2015).

En resumen, la generación de impactos ambientales en las distintas etapas de los procesos mineros no significa necesariamente que las empresas no cumplen con la legislación ambiental. De hecho, muchas de ellas han sido certificadas por la PROFEPA. Sin embargo, la normatividad se encuentra desfasada o no acompaña los nuevos desarrollos tecnológicos. Existen tecnologías menos contaminantes en el mercado, no obstante, sólo una legislación más estricta obligaría a las empresas a adquirirlas.

Los procesos mineros son dinámicos, sus requerimientos varían de empresa a empresa dadas las diferencias entre los yacimientos explotados. En general, éstos han

evolucionado a lo largo del tiempo, la tecnología que emplean dista mucho de la utilizada a principios del siglo XX. Sin embargo, ésta no llega a mitigar o eliminar por completo diversos impactos ambientales, sobre todo cuando se habla del procesamiento de miles de toneladas de mineral por día con bajas concentraciones de metales. Esto ha llevado a que los impactos ambientales se intensifiquen en extensión y en el tiempo. Asimismo, las empresas mineras se enfrentan cada vez más con minerales de mayor complejidad, lo que les ha obligado a utilizar reactivos más tóxicos para el ambiente, y a desarrollar tratamientos que promueven una mayor liberación de los metales pesados, tal es el caso de la lixiviación de piritas.

Los impactos ambientales de mayor significancia en esta actividad son: la destrucción de los ecosistemas, por diversas razones como la extracción y el consumo irracional del agua, la generación de GEI, la emisión de materia particulada, la emisión de sustancias químicas y la generación de jales. Por su naturaleza, los contaminantes generados en los procesos mineros poseen dos orígenes. El primero de ellos, son los propios minerales, los cuales una vez que se extraen del subsuelo y se procesan, son susceptibles de liberar una gran cantidad de metales pesados. El segundo origen de los contaminantes en la minería proviene de las sustancias utilizadas durante todo el proceso, como los explosivos utilizados para golpear y fracturar la roca, las sustancias químicas adicionadas en los procesos de concentración de minerales, y los combustibles y la energía eléctrica empleada en el funcionamiento de la maquinaria y el equipo.

6.2 Contaminantes emitidos y transferidos por la minería

En el presente apartado se analizan los contaminantes emitidos y transferidos por la minería en México, según datos del RETC (2017). A la par se realizan algunas comparaciones entre este registro, el Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes de Canadá (NPRI por sus siglas en inglés) y el Inventario de Liberación de Tóxicos de los Estados Unidos (TRI por sus siglas en inglés) para determinar las diferencias más significativas. Si bien, las empresas presentan información en línea para completar el RETC desde el 2014, el siguiente análisis se centra en el 2017 por varias razones: i) este año ha sido uno de los de mayor participación empresarial; ii) las empresas con una generación baja y media de bióxido de carbono, han

iniciado a contratar terceras empresas para dictaminar sus emisiones según lo establecido en el Reglamento de la LGCC en materia de RENE (DOF, 2014d, p. 21); y iii) Minera Peñasquito, una de las empresas más grandes, trabajó sin interrupciones en el 2017, a diferencia del 2018 donde iniciaron los paros de labores por conflictos con las comunidades aledañas.⁶⁶

Desde principios de 1991, los Ministros de Medio Ambiente de los países miembros de la OCDE consideraban que la reducción de la contaminación ambiental debería ser una de las principales metas de los años noventa. Proponían que la contaminación debería ser reducida en su fuente para evitar el manejo posterior de los residuos. En ese sentido, el Grupo de Prevención y Control de la Contaminación de la OCDE se esforzó por examinar y mejorar los mecanismos de recopilación y publicación de datos sobre las emisiones y transferencias de contaminantes de varios países miembros de la OCDE. Bajo la premisa de que las prácticas de prevención de la contaminación deberían ser encaminadas utilizando instrumentos de mercado (OCDE, 1996, p. 3).

Estas acciones tomaron mayor ímpetu a partir de la Declaración de Río (1992), donde se reivindicó en el principio 10 el derecho del público a la información, asimismo el capítulo 19 de la agenda 21 señaló el enfoque que los gobiernos deberían adoptar para recolectar datos ambientales y facilitar el acceso a la información (OCDE, 1996, p. 10).

México inició a recopilar información ambiental desde 1994, no obstante, fue a partir del 3 de junio de 2004 cuando se publicó el fundamento legal del RETC, el Reglamento de la LGEEPA en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (DOF, 2014f). En un inicio se emitió un listado de 104 sustancias químicas sujetas a reporte, posteriormente este listado se amplió a 200 sustancias, las cuales fueron publicadas en la

⁶⁶ “Quinto. Para los efectos del artículo 16 del presente Reglamento, los Establecimientos Sujetos a Reporte que, a la entrada en vigor del presente Reglamento se encuentren en operación, adjuntarán por primera vez a su reporte anual, el Dictamen de Verificación de sus Emisiones, conforme al siguiente calendario: 1) Más de 1,000,000 Toneladas de Bióxido de Carbono Equivalente, adjuntará el Dictamen de Verificación en el reporte correspondiente al año 2016. 2) 100,000.1 a 999,999.99 Toneladas de Bióxido de Carbono Equivalente, adjuntará el Dictamen de Verificación en el reporte correspondiente al año 2017. 3) 25,000 a 100,000.09 Toneladas de Bióxido de Carbono Equivalente, adjuntará el Dictamen de Verificación en el reporte correspondiente al año 2018” (DOF, 2014d, p. 21).

NOM-165-SEMARNAT-2003 (DOF, 2014a). El RETC se actualiza anualmente con información recopilada en la COA, un instrumento presentado anualmente por las empresas de jurisdicción federal desde los años noventa.

Un RETC es un medio para obtener información regular y periódica acerca de las emisiones y/o transferencias de sustancias de interés y de hacer esta información accesible a todos aquellos que puedan estar interesados y/o afectados por esta. Como tal, un RETC es una herramienta para promover políticas eficaces para preservar y proteger el medio ambiente e impulsar el desarrollo sustentable. Si un RETC está correctamente diseñado e implementado, puede ser muy efectivo en la identificación de las áreas donde se impone una acción del gobierno y en el establecimiento de prioridades para la reducción de riesgos (OCDE, 1996, p. 10).

De acuerdo con el Reglamento de la LGEEPA en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, en el artículo tercero, una emisión se define como una “sustancia en cualquier estado físico liberada de forma directa o indirecta al aire, agua, suelo y subsuelo” (DOF, 2014f, p. 2) y una transferencia como:

“traslado de sustancias sujetas a reporte a un sitio que se encuentra físicamente separado del establecimiento que las generó, con finalidades de reutilización, reciclaje, obtención de energía, tratamiento o confinamiento; incluyendo descargas de agua a cuerpos receptores que sean aguas nacionales y manejo de residuos peligrosos, salvo su almacenamiento” (DOF, 2014f, p. 3).

A pesar de que la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) ha realizado reuniones para fomentar la comparabilidad entre el RETC, NPRI y el TRI (2012), aún no es posible comparar la totalidad de sus resultados debido a múltiples diferencias. Por ejemplo, la cantidad y la variedad de sustancias químicas sujetas a reporte, los límites de reporte, y los criterios bajo los cuales las empresas son seleccionadas para reportar. Sin embargo, es posible llegar a conclusiones generales si se analizan ambos programas a detalle para un año en específico.

Un primer acercamiento al RETC 2017, muestra que 2 690 empresas reportaron la emisión y transferencia de un total de 134 479 418 toneladas de sustancias químicas, donde se muestra que el 99.96 % de las sustancias químicas se emitieron al aire, siendo el bióxido de carbono (CO₂), la principal sustancia emitida con un valor de 99.79 %. El cuadro siguiente presenta un resumen de las sustancias emitidas y transferidas en el RETC 2017.

Cuadro 46 Sustancias emitidas y transferidas en México durante el año 2017

Sustancias emitidas (toneladas)				Sustancias transferidas (toneladas)
Aire	Agua	Suelo	Total	
134 424 975.4 (134 143 336.232 CO ₂)	28 423.4	132.4	134 453 531.2	25 887.0
99.96 % (99.79 % de CO ₂)	0.02 %	0.00 %	99.98 %	0.02 %

Sustancias transferidas (toneladas)							
Reúso	Reciclaje	Coprocesamiento	Tratamiento	Disposición final	Alcantarillado	Otro tipo	Incineración
4 262.1	4 921.0	2 738.5	5 800.3	7 018.5	81.4	605.9	459.4

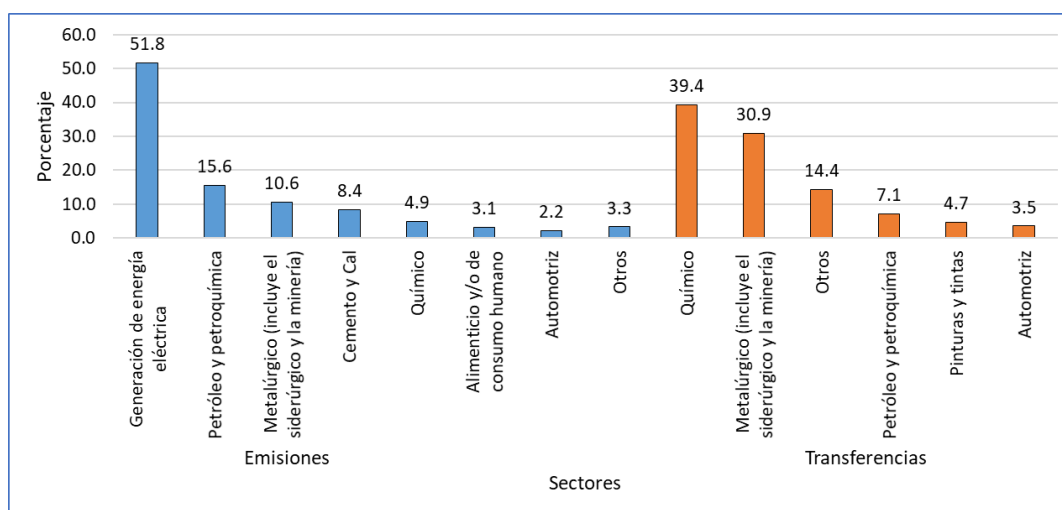
Fuente: elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

La gráfica siguiente muestra un análisis porcentual del RETC 2017 por sectores mayoritarios, donde se observa que el sector metalúrgico ocupó el tercer lugar en emisiones y el segundo lugar en transferencias de sustancias químicas, con un valor del 10.6 y 30.9 % respectivamente. Este sector se compone de 38 subsectores, dentro de los cuales se encuentra la minería del oro, plata, zinc y plomo, y cobre, con números de SCIAN 212221, 212222, 212232 y 212231 respectivamente.⁶⁷ Para fines estadísticos en los párrafos siguientes también se considera la minería del cobre níquel, del hierro, del manganeso, del mercurio y antimonio, y de otros minerales metálicos no ferrosos.

⁶⁷ Sistema de clasificación industrial de América del Norte (SCIAN por sus siglas en español y NAICS por sus siglas en inglés) (INEGI, s/f; United States Census Bureau, 2018).

Gráfica 30 Emisiones y transferencia de contaminantes por sectores mayoritarios RETC

2017



Fuente: Elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

Una comparación de las emisiones y transferencias entre la minería y el sector metalúrgico evidencia que, en conjunto, los diferentes tipos de minería emitieron el 16.2 % y transfirieron el 66.0 % de las sustancias químicas del sector metalúrgico. Las emisiones al aire continúan siendo mayoritarias al igual que en las estadísticas globales del RETC 2017. En el cuadro siguiente se presenta un resumen de esta comparación, donde también se señala que la quinta parte de las empresas de este sector son mineras.

Cuadro 47 Emisiones y transferencias de contaminantes de las empresas mineras y del sector metalúrgico en el año 2017 (toneladas)

	Número de empresas que reportaron	Emisión aire	Emisión agua	Emisión Suelo	Emisiones totales	Transferencias totales
Sector Metalúrgico	368	14 304 912.6	12.3	1.1	14 304 926.1	7 987.0
Mineras	74	2 319 278.1	1.6	0.7	2 319 280.4	5 274.4
Porcentaje	20.1	16.2	13.0	63.6	16.2	66.0

Fuente: elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

El cuadro siguiente muestra las cantidades de sustancias químicas emitidas y transferidas por los diferentes tipos de minería en el RETC 2017. Un dato que salta a primera

vista es que las empresas mineras dedicadas a la producción de oro, ocupan el primer lugar en emisiones al aire, con un valor porcentual de 23.7 respecto a esta categoría. Esto se debe principalmente a que dentro de su proceso incluyen la fundición de precipitados para formar las barras doré.

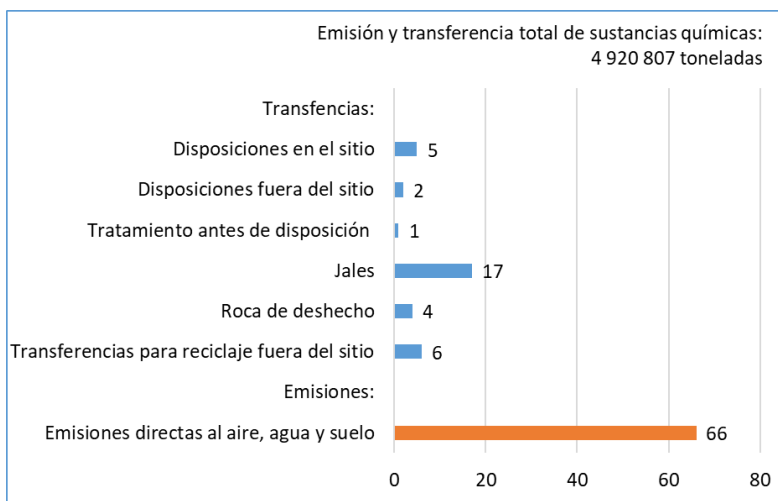
Cuadro 48 Cantidades emitidas y transferidas de sustancias químicas durante el 2017 por tipo de minería (toneladas)

Tipo de minería	Número de empresas que reportaron	Emisión aire	Emisión agua	Emisión Suelo	Emisiones totales	Transferencias totales
Minería del oro	23	548 903.021	0.036	0.086	548 903.143	268.534
Minería del zinc y el plomo	15	405 097.245	0.000	0.537	405 097.782	30.880
Minería del manganeso	1	395 585.748	0.000	0.000	395 585.748	0.000
Minería del hierro	8	388 534.324	0.001	0.019	388 534.344	43.136
Minería de la plata	16	242 362.906	1.449	0.023	242 364.378	4 838.472
Minería de metales metálicos no ferrosos	6	166 489.456	0.018	0.075	166 489.548	91.564
Minería del cobre y el níquel	4	164 483.715	0.094	0.004	164 483.812	1.799
Minería del mercurio y antimonio	1	7 821.680	0.000	0.000	7 821.680	0.000
Total	74	2 319 278.095	1.598	0.742	2 319 280.435	5 274.384
Porcentaje		99.773	0.000	0.000		0.227

Fuente: elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

Por su parte, Canadá reportó en el NPRI 2017 la emisión y transferencia al ambiente de 4 920 807 toneladas de sustancias químicas por 7 001 empresas, dentro de las cuales se encontraban alrededor de 320 sustancias químicas. El desglose de esta cantidad mostró que: 3 226 906 toneladas (65.6 %) se emitieron directamente al ambiente y 1 693 901 toneladas (34.4 %) fueron dispuestas en confinamientos dentro o fuera del sitio. Si se desglosa este 34.4 %, el 6 % se envió a reciclaje, el 17 % fue dispuesto en jales, el 4 % fue dispuesto en rocas de desecho, el 1 % se envió a tratamiento antes de su disposición, el 2 % se dispuso fuera del sitio y el 5 % se dispuso dentro del sitio (Government of Canada, 2020). La gráfica siguiente muestra la distribución porcentual de estos conceptos.

Gráfica 31 Análisis porcentual del NPRI 2017



Fuente: elaboración propia con datos de (Government of Canada, 2020).

Un primer análisis de estos datos muestra que existen diferencias en los destinos de las transferencias. En el caso del NPRI, las transferencias están divididas en disposiciones en el sitio, disposiciones fuera del sitio, transferencias fuera del sitio para su tratamiento antes de su disposición final y transferencias fuera del sitio para reciclaje y recuperación de energía (Government of Canada, 2011, pp. 13–14). Las disposiciones en el sitio también consideran la posibilidad de reportar las sustancias químicas inmersas en los jales o en otros desechos de rocas minerales.

On-site disposals include the following:

- Landfill: total quantities of substances sent for final disposal to a designated landfill area located within the site boundaries.
- Land application: total quantities of substances sent for final disposal by application or incorporation into soil within the site boundaries.
- Underground injection: total quantities of substances disposed of by injection underground from within the site boundaries.
- Tailings and waste rock: net quantities of substances that are moved into an on-site area where tailings or waste rock are discarded or stored and further managed to reduce or prevent releases (Government of Canada, 2011, p. 13).

En el RETC, se recopilan datos de las transferencias dirigidas a reusó, reciclaje, coprocesamiento, tratamiento, disposición final, alcantarillado, incineración y otros. Específicamente, la disposición final se refiere a “transferencia de una sustancia RETC en un residuo peligroso para su disposición final en instalaciones cuyas características permitan

prevenir su liberación al ambiente” (DOF, 2015, p. 54). Esta última definición no considera el reporte de las sustancias químicas inmersas en los jales, en las pilas de lixiviación, o en las rocas de desecho, los cuales son depositados respectivamente en presas de jales, en montones sobre suelo impermeabilizado por una geomembrana, y en suelos naturales. Estos lugares no son considerados lugares de disposición final dentro del sitio, a pesar de que lo son.

Esta es una diferencia muy importante entre el NPRI y el RETC. Si bien en el NPRI no se reportan las cantidades totales de rocas desechadas, sino las concentraciones promedio de las sustancias de reporte que ingresan a los lugares de depósito de los jales y de la roca de desecho, el RETC no considera este parámetro. Esto se ve reflejado en las mínimas cantidades de sustancias químicas reportadas en emisiones al suelo de acuerdo con el cuadro anterior.

If, after considering the reporting criteria applicable to your facility, you determine that information on tailings and/or waste rock disposal is required to be included, you must report the following information:

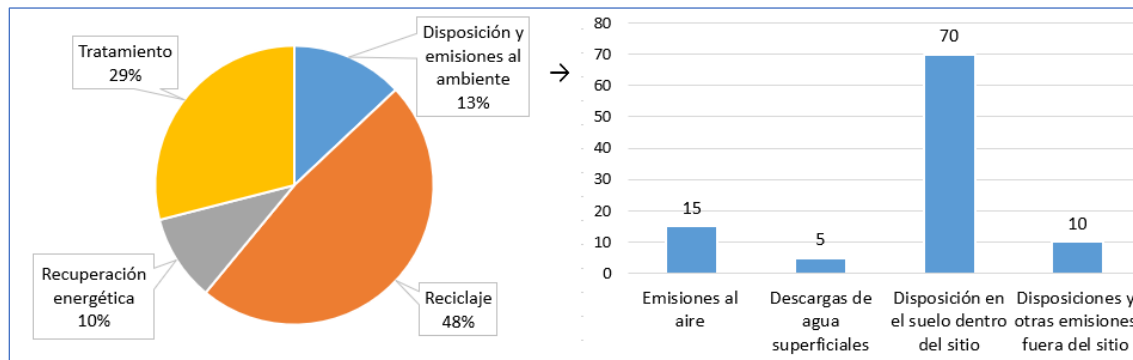
- net quantity of the substance(s) being disposed on-site and/or off-site in the calendar year
- information on sampling concentrations with respect to the detection limit of the measurement method used
- actual detection limit for the measurement method used to generate the net quantity value
- average concentrations for the material entering the tailings and/or disposal management area
- details on any quantities excluded from the net quantities reported (Government of Canada, 2019).

En el caso de Estados Unidos el panorama es similar, en este país, 21 456 instalaciones reportaron el manejo de 30 570 millones de libras (13 866 307 toneladas) de sustancias químicas en el TRI (2017).⁶⁸ De este total, el 87 % (12 063 687 toneladas) fue reciclado, utilizado para recuperar energía o tratado por diferentes medios, y el 13 % (1 802 620 toneladas) restante fue dispuesto o emitido al ambiente (EPA, 2019a, p. 8). Las sustancias químicas y categorías de sustancias químicas enlistadas para reportar en el TRI (2017) fueron 695 (EPA, 2017), no obstante las instalaciones sólo reportaron 563 de este listado (EPA, 2019a, p. 29). La gráfica siguiente muestran con mayor detalle el destino de

⁶⁸ Para realizar la conversión de libras a toneladas, se consideró que una libra es igual a 0.000453592 toneladas.

las sustancias químicas reportadas en el TRI (2017), donde también se desglosa el 13 % dispuesto o emitido al ambiente.

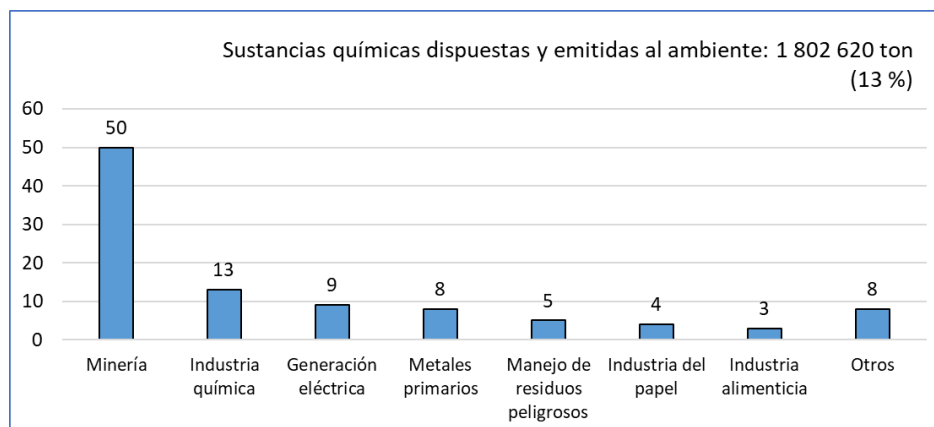
Gráfica 32 Análisis porcentual del TRI 2017



Fuente: datos de EPA (2019a, p. 2).

De acuerdo con estos datos, del 13 % dispuesto o emitido al ambiente, la mayor cantidad de sustancias químicas se dispuso en el suelo dentro del sitio. La minería fue la principal actividad que desarrollo esta actividad, dispuso 1 950 millones de libras (884 504 toneladas) de sustancias químicas en el suelo de las operaciones mineras. De manera global, del total de sustancias químicas manejas en Estados Unidos, el 6.4 % fue dispuesto en el suelo por la minería (EPA, 2019a, p. 43). Estos datos sitúan a la minería como la principal actividad industrial que dispone sustancias en el ambiente, en el cuadro siguiente se presenta un resumen porcentual de las disposiciones y emisiones al ambiente reportadas en el TRI 2017.

Gráfica 33 Disposiciones y emisiones al ambiente por tipo de actividad TRI 2017



Fuente. elaboración propia con datos de EPA (2019a, p. 43).

Otra diferencia entre los registros es el reporte de diferentes tipos de sustancias químicas. Mientras que en el RETC se tienen 200, en el NPRI 320 y en el TRI 695. Este último registro posee el mayor número de sustancias químicas de reporte. Si bien cada país tiene diferentes criterios para incluir nuevas sustancias en los registros, el TRI tiene mayor representación por el hecho de abarcar mayores cantidades de sustancias químicas.

A continuación, se analiza el RETC 2017 por tipo de sustancia química para la minería. Como se puede observar, la principal sustancia emitida es el bióxido de carbono, con un valor de 2 310 026 toneladas, seguida por el óxido nitroso, el bióxido de nitrógeno y el metano con valores de 7 580, 927 y 722 toneladas respectivamente.

Cuadro 49 Emisiones y transferencias de sustancias químicas en la minería de oro, de plata, de zinc y plomo, de cobre níquel, de hierro, de manganeso, de mercurio y antimonio y de otros minerales metálicos no ferrosos (kilogramos por año)

Sustancia química	Emisión al aire	Emisión al agua	Emisión al suelo	Transferencia
Acenafteno	1 000.3			
Arsénico	9.2			
Arsénico (compuestos)		64.4	31.2	
Asbesto				31 516.0
Benceno	3 012.3			
Benzo(b)fluoranteno	15 000.0			
Bióxido de carbono	2 310 025 864.4			
Bióxido de nitrógeno	927 280.0			
Cadmio (compuestos)		86.3	36.1	8.4
Cianuro inorgánico/orgánico				48 447.7
Cromo (compuestos)		954.3	220.3	41.5
Cromo (polvos respirables, humos o vapores)	4.7			
Formaldehido	3 473.4			
Mercurio	2.7			
Mercurio (compuestos)		1.5	0.1	1.8
Metano	721 954.0			
Níquel (compuestos)		245.8	261.1	101.4
Níquel (polvos respirables, humos o vapores)	170.6			
Nitrato de plata				31 230.0
Óxido nitroso	7 579 725.0			
Plomo (compuestos)	6.5	245.6	193.6	205 887.6
Plomo (polvos respirables, humos o vapores)	592.0			4 957 146.1
Porcentajes totales	99.8	0.0	0.0	0.2

Fuente: elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

Al igual que en las estadísticas globales, casi el 100 % de las sustancias químicas reportadas por la minería se dirigió al aire. A diferencia del NPRI 2017 donde el 21 % del total de sustancias químicas reportadas se dirigió a las presas de jales y otros lugares de disposición de rocas de deshecho (Government of Canada, 2020). Este hecho obedece en

gran medida a que en el RETC se está considerando el bióxido de carbono dentro de las sustancias sujetas a reporte, en tanto que en el NPRI y en el TRI no se considera. Canadá y Estados Unidos sólo consideran esta sustancia dentro de los inventarios de emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero. Como esta sustancia se encuentra en gran cantidad en el RETC, opaca a las demás sustancias químicas y no permite sopesar otras sustancias de interés a primera vista.

En Estados Unidos, el 13 % de las sustancias químicas dispuestas y emitidas al ambiente, donde participa en gran medida la minería, fueron representadas en un 76 % por las siguientes sustancias: plomo (25 %), zinc (19 %), compuestos de nitrato (6 %), manganeso (6 %), arsénico (6 %), bario (5 %), cobre (4 %) y amoníaco (4 %) (EPA, 2019a, p. 42). De estas sustancias, en el RETC sólo se encuentran el plomo, el arsénico, el sulfato de cobre, el nitrato de cadmio, el nitrato de plata y el nitrato de propilo. Otra sustancia de interés para la minería es el ácido sulfúrico, el cual es considerado tanto en el NPRI como en el TRI pero no en el RETC (EPA, 2017; Government of Canada, 2018). A pesar de que en México esta sustancia ha sido objeto de amplios debates dados los accidentes ocurridos en el Río Sonora y en el Mar de Cortés en empresas de Grupo México.

Considerando que en el RETC se incluye al bióxido de carbono y otros GEI, en los párrafos siguientes se realiza un análisis de la minería y estas sustancias químicas. Un acercamiento inicial muestra que de las 74 empresas mineras que reportaron en el RETC 2017, 52 emitieron 100 000 kg de bióxido de carbono o más, el límite establecido en la NOM-165-SEMARNAT-2003. En el cuadro siguiente se presenta un análisis jerárquico de todas las empresas mineras que reportaron esta sustancia, donde se evidencia que son siete las que generaron más de la mitad de este gas. En especial, la Compañía Minera Autlan, Minera Peñasquito y Minera Real de Ángeles Unidad Noria de Ángeles, encabezan la lista con un 43 %.

Cuadro 50 Principales empresas mineras generadoras de bióxido de carbono en México durante el año 2017

Empresa	Tipo de minería	Ubicación	Toneladas de bióxido de carbono producidas durante el 2017	Porcentaje
Compañía Minera Autlan S.A.B. de C.V.	Minería del manganeso	Hidalgo	395 469.4	17.1
Minera Peñasquito S.A. de C.V.	Minería del zinc - plomo	Zacatecas	373 129.9	16.2
Minera Real de Ángeles S.A. DE C.V. Unidad Noria de Ángeles	Minería de la plata	Zacatecas	225 274.8	9.8
Las Encinas S.A. de C.V. Planta Peletizadora	Minería del hierro	Colima	142 695.9	6.2
Minera Media Luna S.A. de C.V. Proyecto Minero Morelos	Minería del oro	Guerrero	139 545.1	6.0
Cobre del Mayo S.A. de C.V.	Minería del cobre - níquel	Sonora	124 469.5	5.4
Mexicana de Cobre S.A. de C.V. Complejo Minero La Caridad	Minería de metales no ferrosos	Sonora	122 326.0	5.3
Total			1 522 910.6	65.9

Fuente: elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

En el cuadro siguiente se realiza el anterior análisis, pero ahora para todas las empresas del sector metalúrgico que reportaron emisiones de bióxido de carbono. Como se puede observar, 20 empresas de un total de 274 contribuyeron con el 80.9 % del bióxido de carbono reportado por este sector en el RETC 2017. Este cuadro también advierte que Compañía Minera Autlan, Minera Peñasquito, Minera Real de Ángeles (Unidad Noria de Ángeles) y Minera Media Luna (Proyecto Minero Morelos) ocuparon jerárquicamente los lugares 8, 9, 13 y 20 respectivamente. En conjunto estas empresas contribuyeron con el 8 % del bióxido de carbono reportado por el sector metalúrgico. A nivel nacional, estas mismas empresas ocuparon los lugares 84, 88, 123 y 161 respectivamente, de un total de 1452 empresas que reportaron emisiones de bióxido de carbono en el RETC 2017.

Cuadro 51 Principales empresas del sector metalúrgico que reportaron emisiones de bióxido de carbono durante el año 2017

No.	Empresa	Estado donde se ubica	Porcentaje de emisión de bióxido de carbono dentro del sector metalúrgico
1	Arcelomittal México S.A. de C.V.	Michoacán	17.1
2	Arcelomittal Las Truchas S.A. de C.V.	Michoacán	13.8
3	Diecasting Celaya S.A. de C.V.	Guanajuato	7.4
4	Grupo Fandeli S.A. de C.V.	Querétaro	7.1
5	Jovita Rivera Bravo, Metales y Aluminios Exclusivos JTQ	San Luis Potosí	6.6
6	Industrias Car S.A. de C.V.	Distrito Federal	4.9
7	Ternium México S.A. de C.V.	Nuevo León	2.9
8	Compañía Minera Autlan S.A.B. de C.V.	Hidalgo	2.8
9	Minera Peñasquito S.A. de C.V.	Zacatecas	2.6
10	Ternium Mexico S.A. de C.V. Planta Churubusco	Nuevo León	2.3
11	Industrias John Deere S.A. de C.V. Planta Loaders	Coahuila	1.9
12	U.S. Pipe México, S. de R.L. de C.V.,	Nuevo León	1.7
13	Minera Real de Ángeles S.A. de C.V. Unidad Noria de Ángeles	Zacatecas	1.6
14	NEMAK S.A.B. de C.V. Tenedora NEMAK	Nuevo León	1.5
15	Mexicana de Cobre S.A. de C.V.	Sonora	1.3
16	TA 2000 S.A. de C.V.	Veracruz	1.2
17	Deacero S.A.P.I. de C.V. Planta Aceria Laminación Celaya	Guanajuato	1.1
18	Metalúrgica Met-Mex Peñoles S.A. de C.V. Planta Fundición Plomo Plata	Coahuila	1.1
19	Las Encinas S.A. de C.V. Planta Peletizadora	Colima	1.0
20	Minera Media Luna, S.A. de C.V. Proyecto Minero Morelos	Guerrero	1.0
	Total		80.9

Fuente: elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

Otro gas de efecto invernadero de importancia listado en el RETC es el óxido nitroso (NO_2), un gas con un potencial de calentamiento global a cien años de 265 veces más que el bióxido de carbono (A. de J. Ramírez et al., 2016, p. 30). Un gas que deriva de la detonación de explosivos durante las voladuras. La NOM-165-SEMARNAT-2003 establece que las empresas que emitan o transfieran 100,000 kg por año o más de este contaminante, están obligadas a reportarlo en el RETC. A nivel nacional, 31 empresas fueron sujetas de reporte del óxido nitroso en el RETC 2017, dentro de las cuales se encontraban cuatro

mineras que en suma reportaban el 16 % del total nacional. En el cuadro siguiente se presentan las empresas mineras que reportaron esta sustancia química.

Cuadro 52 Empresas mineras que reportaron la emisión de óxido nitroso en el RETC 2017 (kilogramos)

Empresa	Tipo de minería	Ubicación	Óxido nitroso emitido (kg)
Desarrollos Mineros San Luis S.A. de C.V. Unidad Minera Los Filos	Minería de oro	Guerrero	5 772 125
Minera Media Luna, S.A. de C.V. Proyecto Minero Morelos	Minería de oro	Guerrero	725 350
Don David Gold México S.A. de C.V.	Minería de plata	Oaxaca	938 850
Minera Peñasquito, S.A. de C.V.	Minería de plomo y zinc	Zacatecas	143 400
Total			7 579 725
Total, nacional			47 625 945

Fuente: elaboración propia con datos del RETC 2017 (SEMARNAT, s/f).

Revisando las estadísticas globales de NPRI 2017, los principales contaminantes emitidos al aire fueron el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (representados por el NO₂) y la materia particulada (Government of Canada, 2018). El RETC no considera el reporte de ninguna de estas sustancias, excepto del óxido nitroso. Estos contaminantes en la minería provienen de la quema de combustibles fósiles, del uso de explosivos y de la explotación del mineral.

Es difícil establecer la cantidad de toneladas de bióxido de carbono (tCO₂-e) que se emite en la generación de un kilogramo de oro, pues este valor depende de diversos factores como el tipo de mineral beneficiado, el proceso empleado, la cantidad de energía eléctrica consumida, los combustibles gastados y las concentraciones de los metales en los minerales.⁶⁹ En el cuadro siguiente se presenta una estimación de la generación de tCO₂-e por kilogramo de oro producido en la empresa Minera Peñasquito. Los datos presentados

⁶⁹ “Toneladas de bióxido de carbono equivalentes: unidad de medida de los gases de efecto invernadero, expresada en toneladas de bióxido de carbono, que tendrían el efecto invernadero equivalente” (DOF, 2018h, p. 5)

en este cuadro fueron obtenidos del reporte técnico NI-43-101 (Goldcorp, 2018) y de la COA (2017) sección 6 (Minera Peñasquito, 2018) solicitada a la SEMARNAT.^{70 71}

Cuadro 53 Toneladas de bióxido de carbono equivalente emitidas por kilogramo de oro producido en la empresa Minera Peñasquito (2017)

Mineral procesado durante el año 2017 (toneladas)	Oro producido (onzas) ⁷²	tCO ₂ -e producidas	tCO ₂ -e por tonelada de mineral procesado	tCO ₂ -e por kilogramo de oro producido
37 083 413 por flotación y 0 por lixiviación	2 358 por lixiviación 526 972 por flotación Total 529 330	983 986.64	0.027	59.766

Fuente: elaboración propia con datos de Goldcorp (2018, pp. 1–9 y 17–10) y Minera Peñasquito (2018).

Las tCO₂-e por kilogramo de oro producido y por tonelada de mineral procesado calculadas en el cuadro anterior, son sólo una estimación para la empresa Minera Peñasquito durante el año de operación 2017. Las tCO₂-e pueden variar de empresa a empresa inclusive si poseen el mismo tipo de proceso. Como se puede observar, las casi 60 tCO₂-e por kilogramo de oro producido derivan básicamente del proceso de flotación. El producto de este proceso es un concentrado que no pasa a refinación (no forma barras doré), es vendido como tal. De acuerdo con la información proporcionada en el reporte técnico NI-43-101 (Goldcorp, 2018), no se procesó mineral por lixiviación en ese año. Las onzas de oro obtenidas por lixiviación fueron de las pilas que ya se tenían en operación. También en este reporte técnico se menciona que las toneladas de mineral procesado tienen leyes de reserva bajas de 0.27 g/t de oro (Goldcorp, 2018, pp. 1–9 y 17–10).

⁷⁰ NI-43-101 “is a national instrument for the Standards of Disclosure for Mineral Projects within Canada. The Instrument is a codified set of rules and guidelines for reporting and displaying information related to mineral properties owned by, or explored by, companies which report these results on stock exchanges within Canada” (Wikipedia, 2018).

⁷¹ La sección 6 de la COA aplica sólo para empresas que generen emisiones anuales superiores a 25,000 toneladas de bióxido de carbono equivalente. Esta sección se adicionó a la COA desde el año de reporte 2014 para apoyar el desarrollo del Registro Nacional de Emisiones (RENE).

⁷² Considerando que un kilogramo equivale a 32.1507466 onzas troy.

Haque y Norgate estimaron mediante el software Simapro 7.3 LCA que para producir un kilogramo de oro ya refinado se generan 29 tCO₂-e. Esta cantidad de GEI fue estimada para una mina de Australia donde se asumió que el mineral poseía una concentración de oro de 2 g/t, además, se supuso que el oro fue extraído a través de un proceso de lixiviación con tiosulfato de sodio. Según resultados de la simulación, el 56 % de los GEI se generan durante la extracción y la concentración del mineral, el 39 % se producen en la refinación final del oro, y el 5 % restante se emiten por el uso de sustancias químicas durante todo el proceso (2014).

Si se compara la estimación que realiza Haque y Norgate con la desarrollada para la empresa Minera Peñasquito, es obvio que existen muchas diferencias. No obstante, la más relevante es la concentración de oro en el mineral tratado, mientras que estos autores asumen un valor de 2 g/t, Minera Peñasquito procesa minerales de 0.27 g/t. Este es uno de los aspectos principales por los que las tCO₂-e emitidas por Minera Peñasquito son muy superiores a las calculadas por los autores. Este hallazgo advierte que, a mayor volumen de mineral procesado con bajas concentraciones de metales, en este caso de oro, mayor número de tCO₂-e se emiten al ambiente.

Un análisis de los procesos mineros permite inferir que la lixiviación en pilas es uno de los procesos que menos cantidad de tCO₂-e emite al ambiente. Esto se debe a que el mineral extraído sólo es triturado y no molido como en el caso de la flotación por sulfuros o la lixiviación dinámica, lo que implica un ahorro de energía. En algunas ocasiones la trituración puede ser obviada si durante las voladuras se produce una buena fragmentación del mineral. Al mismo tiempo, la lixiviación en pilas generalmente se desarrolla en minas a cielo abierto, donde no existe ventilación forzada ni consumo de energía eléctrica por este concepto. Otra razón por la que la emisión de tCO₂-e es menor en este tipo de proceso, es que una vez que se apila el mineral en los patios de lixiviación, prácticamente este no se vuelve a mover. Los patios son superficies utilizadas tanto para la extracción del oro y la plata como para la disposición final de las camas o pilas de mineral ya tratado. Estas particularidades, hacen que la lixiviación en pilas emita menos tCO₂-e que los procesos de flotación.

En resumen, el RETC a diferencia del NPRI y el TRI es un registro cuyo desarrollo aún está en proceso. Si bien existen diferencias entre estos tres registros, es notable que, en el RETC, la cantidad de sustancias químicas que reporta la minería es inferior a la reportada en el NPRI y en el TRI. Esto se debe en gran medida a lo limitado del listado de las sustancias de reporte, dos veces y media menor que el TRI, y a que los contaminantes que se disponen en las presas de jales y en otros lugares de disposición de rocas de deshecho no son cuantificados. Las emisiones al aire son más considerables que las disposiciones en el sitio en la minería. Esto se debe a que el bióxido de carbono, un gas de efecto invernadero de gran generación, también es cuantificado dentro de este registro, lo que opaca a las demás sustancias químicas y no permite sopesar otros contaminantes a primera vista.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

La presente investigación es el resultado de una serie de actividades académicas que analizan los aspectos históricos y estructurales de la minería, así como datos cuantitativos y cualitativos procedentes de entrevistas y de ámbitos gubernamentales, académicos y comerciales. Dentro de estas actividades destacan la asistencia a eventos de la minería como la Convención Internacional de Minería realizada en Acapulco en octubre del 2019; la visita a Minera Peñasquito ubicada en el estado de Zacatecas el 8 de agosto de 2019; y una estancia académica en el CINVESTAV unidad Saltillo en el área de metalurgia extractiva en septiembre del 2019. Es una investigación interdisciplinaria donde han confluído tanto las ciencias naturales como las ciencias sociales.

El escenario fue la gran minería de México, un país con grandes reservas mineras que se ubicó dentro de los primeros nueve países productores de oro, plata, zinc, plomo y cobre en el 2018. Actualmente en este país existen seis de las quince minas productoras de plata más grandes del mundo, de las cuales tres son operadas por Fresnillo plc, una por Fortuna Silver Mines Inc., una por Pan American Silver Corp., y otra por Coeur Mining. También en México se ubica una de las minas más productivas de oro a cargo de Fresnillo plc, tal es el caso de La Herradura, ubicada en el estado de Sonora. Gran parte de la investigación se desarrolló en el estado de Zacatecas debido a que es el primer productor de plata, plomo y zinc a nivel nacional, aportó el 8 % de la plata a nivel mundial, y posee tres de las minas más grandes de plata en el mundo: Saucito, Fresnillo y la Colorada.

El desarrollo tecnológico propiciado por las dos últimas revoluciones industriales, enfocado en la explotación y procesamiento de grandes cantidades de minerales con bajas concentraciones de metales, junto a una legislación ambiental desfasada de estos nuevos avances, han contribuido a aumentar la degradación del ambiente generada por la minería de México. En los párrafos siguientes se explican con mayor detalle los argumentos que sustentan esta afirmación y se resaltan las conclusiones de mayor trascendencia en esta investigación.

Durante las últimas décadas, la minería ha llamado la atención de diversos actores en la sociedad debido a sus impactos sociales y ambientales. Un estudio bibliométrico realizado con el software VOSviewer versión 1.6.15 sobre 1 791 documentos disponibles en la base de datos de *Scopus* durante el periodo 2000-2020, mostró que las publicaciones en minería tienen una tendencia al alza y las investigaciones se concentran en 7 grupos y 44 líneas de investigación. Los temas objeto de la presente investigación se encuentran representados en las líneas de investigación más significativas. Siendo las más prominentes: Impacto ambiental; Efectos económicos, ecológicos y sociales de la minería; Leyes y regulaciones mineras; Tecnología de automatización; Recursos minerales; y Protección Ambiental. Esta orientación es una prueba de la preocupación que existe a nivel mundial por el desempeño de esta actividad y sus consecuencias sociales y ambientales.

El avance en las tecnologías de la información y su integración con las tecnologías operativas ha transformado a la minería al igual que otras ramas industriales. La tendencia en esta área es el desarrollo de sistemas de control y automatización equipados con elementos de Industria 4.0 para sincronizar cada una de las fases del proceso. Estos sistemas desarrollan tareas más efectivas, y aseguran mejores condiciones de seguridad, mayor protección de los equipos, menores tiempos muertos, ahorros energéticos y mayores índices de productividad. La idea es que los diferentes tipos de maquinaria y equipo se vuelvan cada vez más autónomos y que su operación y supervisión se deslinde del trabajador. Bajo esta perspectiva, empresas como Minera Peñasquito poseen ya perforadoras rotativas de la marca Epiroc totalmente autónomas.

En la actualidad las grandes empresas mineras que operan en México han automatizado varias de sus actividades, algunas inician a colocar infraestructura y servicios de telecomunicaciones en todos los espacios de las minas, para automatizar, controlar y digitalizar todas las actividades. De hecho, los nuevos avances tecnológicos en la minería, tratan de que los nuevos sistemas centralizados de control que se instalen reconozcan las actividades mineras previamente automatizadas. Los sistemas de control y automatización utilizados por la minería de México son producidos por empresas extranjeras, no obstante,

se vislumbra el inicio del desarrollo de empresas mexicanas proveedoras de tecnología como es el caso de Lasec.

Esta nueva transformación tecnológica ha llevado a la minería a un nuevo nivel de producción, donde el aumento de dimensiones ha traído consigo un mayor consumo de insumos, dentro de los que destacan el agua y la energía y las sustancias químicas. Esto a su vez ha contribuido a modificar los patrones ecológicos del ambiente y a generar mayor cantidad de residuos, llámense jales, aguas residuales, GEI u otras sustancias químicas.

Aunque la tecnología actual puede coadyuvar a mitigar los impactos al ambiente, estos no pueden ser eliminados en su totalidad, dadas las cantidades de minerales extraídos y procesados que superan por mucho los registros históricos. Si bien estas han permitido explotar y beneficiar un mayor volumen de minerales, los beneficios que pudieran generar en pro del ambiente se pueden contrarrestar por el solo hecho de manejar estos grandes volúmenes. Esto ha motivado a que muchas de las comunidades aledañas a las unidades mineras se quejen por la disminución de las reservas de agua, el aumento de los polvos provenientes de los movimientos de material, la apertura de caminos, el aumento de los jales, la modificación del paisaje, entre otros aspectos que provocan afectaciones significativas a la salud y a los ecosistemas existentes.

Las nuevas tecnologías han aumentado el nivel de producción, disminuido los costos operativos, y de manera colateral han beneficiado el ambiente, pero este último factor no ha sido más importante que los primeros. El desarrollo de nuevas tecnologías está orientado hacia la generación de ganancias y, en menor escala hacia otras actividades como la protección del ambiente. Dado que en los gastos de una empresa ingresan aspectos no sólo técnicos sino también socio-legales, como el pago de impuestos, el pago de seguros y otros, es posible que procesos más contaminantes sean utilizados en la medida de que su relación costo/beneficio sea más favorable.

Esta situación se refleja claramente cuando se revisan los porcentajes de inversión por la gran minería de México. La adquisición de equipo es uno de los rubros en que más este subsector ha invertido, en promedio tuvo un valor de casi 22 % del total invertido

durante el periodo 2008-2017. Un valor comparable con los porcentajes promedio de inversión en nuevos proyectos y expansión de proyectos con valores que fluctuaron en torno al 20 %. Pero muy por encima de las inversiones en medio ambiente y energías limpias, seguridad y salud en el trabajo, y apoyo a las comunidades y desarrollo comunitario, que no sobrepasaron el 7 % promedio durante el periodo 2008-2017.

La automatización y la digitalización de una mina es uno de los factores que ha contribuido a concentrar y centralizar cada vez más el capital en la gran minería. Según información del SGM, el caso más notable es el del oro, cuyo porcentaje anual de producción por la gran minería pasó del 42 al 99 % entre el 2006 y el 2016. En una década casi el 57 % de la producción de oro dejó de ser aportada por la pequeña y mediana minería.

En general, poco menos del 100 % de la producción anual de oro, plata, plomo, zinc y cobre se encuentra en manos de la gran minería y, además, más de la mitad de la producción de metales metálicos se encuentra en manos de siete grandes empresas: Fresnillo plc, Goldcorp, Industrias Peñoles, Grupo México, Pan American Silver, Agnico Eagle y Minera Frisco. En el caso del cobre, Grupo México produce casi el 80 % de este metal. Si se considera que se pueden extraer diferentes metales en un mismo yacimiento, la concentración de capital por empresa se incrementa. La pequeña y mediana minería han sido desplazadas casi en su totalidad, en conjunto, producen menos del 5 % de los metales objeto de estudio.

Por otro lado, las nuevas tecnologías han sustituido al trabajador por maquinaria y equipo en las diferentes etapas del proceso minero, aunque esta situación aún no se refleja en las estadísticas globales de empleo debido al aumento de empresas mineras en etapa productiva. Esta sustitución se da tanto en puestos calificados como en puestos operativos. Las organizaciones mundiales muestran preocupación por los impactos que los nuevos desarrollos tecnológicos ejercerán sobre el empleo. En el caso de la minería de México, este aspecto es alarmante, debido al aumento de los conflictos entre los trabajadores y las empresas.

La minería es una actividad que requiere de grandes inversiones, por citar un ejemplo, el costo por hora en un proceso de flotación fluctúa entre 60 y 100 mil dólares en las plantas de Peñoles. Esto implica que los procesos deben ser estables por largos periodos de tiempo para que sean rentables, por lo que las empresas mineras buscan países receptores cuyas políticas gubernamentales les favorezcan. En México, estas políticas pusieron a la venta de empresas mineras paraestatales, desincorporaron reservas minerales, desregularon el ejido y ampliaron los límites de concesión. Otras acciones gubernamentales poco referidas y que también han favorecido la entrada del capital transnacional han sido: la apertura en gran medida gratuita a la información geológica nacional, las subastas de recursos minerales, las licitaciones de yacimientos con reservas mineras probadas por el SGM, y el cumplimiento de regulaciones ambientales desfasadas de los nuevos desarrollos tecnológicos, o el concesionamiento del subsuelo a pesar de la existencia de ciudades enteras en la superficie. GeoInfoMex corrobora este último aspecto, al mostrar en su sistema que gran parte del subsuelo de la ciudad de Zacatecas se encuentra concesionado.

La legislación ambiental se ha ido transformando desde que México se conformó como una nación independiente. La Constitución Política de 1917 marcó la pauta regulatoria para conservar y aprovechar los recursos naturales por causa de interés público, aunque en la práctica estas disposiciones no han sido prioritarias. En todos los periodos de desarrollo analizados, las regulaciones ambientales se hicieron presentes, si bien sus resultados no fueron trascendentales, las disposiciones legales se ajustaron en todo momento al nivel de desarrollo de las fuerzas productivas y de los conflictos sociales. Así, por ejemplo, impactos ambientales evidentes como la deforestación y la contaminación de los cursos de agua fueron incorporados tempranamente.

El hito en el desarrollo de la legislación ambiental inició cuando México se adhirió a organismos multilaterales como el GATT (1986), la OCDE (1994), y la OMC (1995), así como, cuando negocia el TLC (1993), el ACAAN (1993) y otros convenios. A través de estos tratados y convenios, México asumió compromisos externos para dar mayor apertura al capital que tuvo que sincronizar con sus marcos regulatorios. En ese sentido, las pausas legislativas son

dictadas en gran medida por los convenios y tratados, y los principios base de las Conferencias Mundiales sobre el Medio Ambiente. Por su parte el Poder Legislativo y el Ejecutivo han generado los mecanismos para hacerlas cumplir a través de los distintos niveles de gobierno.

El hecho de que las empresas mineras puedan adquirir superficies ilimitadas para explotar y procesar miles de toneladas de minerales por día, implica que diversas regulaciones tienen una naturaleza ilimitada, como los cambios de uso de suelo, los impactos y los riesgos ambientales, el consumo de agua, el ruido y las vibraciones, el uso de sustancias químicas, la generación de jales y otros residuos, y la emisión de sustancias químicas y GEI. La legislación ambiental se ha venido desarrollando sin tomar en consideración el volumen de explotación de minerales. Una empresa puede tener varios puntos de emisión de contaminantes dentro de los límites normativos, pero a la vez, estar emitiendo una cantidad de contaminantes por arriba de los umbrales permisibles para la salud.

En general, la legislación ambiental mexicana se caracteriza por ser prioritariamente de tipo de comando y control, donde las normas oficiales mexicanas fijan límites permisibles de emisión de contaminantes al ambiente. La aplicación de cargos por contaminación e impuestos verdes es pobre en México, aunque existen ejemplos claros de su uso. Por ejemplo, se tienen cargos económicos cuando se exceden los límites de descarga de contaminantes en las aguas residuales, establecidos en el permiso otorgado por la CNA; o cuando se extrae más agua subterránea que la mencionada en el título de concesión correspondiente.

Las normas oficiales mexicanas en materia de regulación de procesos mineros datan de principios del siglo XXI, a pesar de que estos tienen antecedentes desde inicios del siglo pasado. Como las leyes en este país tienen un carácter no retroactivo, persisten muchos pasivos ambientales en esta actividad. Las normas que regulan los procesos mineros se erigieron en un contexto donde los diversos conflictos socioambientales mantenían una tendencia al alza. Una serie de hechos donde destaca la creación del Foro Intergubernamental sobre Minería, Minerales, Metales y Desarrollo Sostenible auspiciado

por Naciones Unidas en la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en Johannesburgo (2002) y la publicación del informe *Abriendo brecha: Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable* (2007), obligó a diversos países a normalizar los procesos mineros. Este es un ejemplo más de cómo la legislación ambiental en México se ha venido desarrollando como resultado de las presiones internacionales.

A pesar de que se han desarrollado diversas normas, no existe una que dicte medidas específicas para el cierre de una mina. Si bien este tema es retomado en la evaluación del impacto ambiental y en la NOM-141-SEMARNAT-2003, la legislación ambiental no concentra en un sólo documento las disposiciones para el cierre de una mina. Tampoco existe una norma que regule los niveles de sismicidad por efecto de las detonaciones en una mina. Existen otras normas que no se encuentran a cargo de las autoridades ambientales cuya importancia ha sido minimizada. Estas normas administradas por la Secretaría de Salud que regulan la calidad del aire en los alrededores de las unidades mineras, no se encuentran desarrolladas en su totalidad. De manera relevante, no existe una norma de esta naturaleza que regule la concentración de cianuro en el aire ambiente, un aspecto de suma importancia cuando se habla de la lixiviación de miles de toneladas de mineral en el ambiente.

El marco regulatorio vigente ha contribuido a disminuir los costos operativos de las empresas mineras y a degradar el ambiente. En materia de agua se identifican una serie de hechos que dan sustento a esta afirmación. Uno de los más evidentes es que la LAN (1992) autoriza la transmisión parcial o total de los derechos de agua establecidos en las concesiones, esto permite deslindar un título de concesión o una parte de éste de una porción definida de tierra. Esta situación es aprovechada por las empresas mineras y de otra índole, quienes compran derechos de agua a campesinos para cubrir sus necesidades y aumentar su producción. Además, las empresas tienen la posibilidad de perforar pozos en áreas con mayor factibilidad de agua independientemente si se encuentran fuera o dentro de la unidad minera. El equilibrio establecido entre una concesión y una porción de tierra es subyugado por las grandes empresas mineras y por las mismas autoridades. Esta nueva

modalidad de manejo de los títulos de concesión propició que el agua dejará de ser vista como un bien común, para pasar a ser una mercancía más del propio sistema.

Las empresas mineras también manifiestan que sus sistemas de procesamiento de minerales son “circuitos cerrados” donde el agua de proceso se descarga al tanque espesador y a las presas de jales para luego reusarse. No obstante, el agua que se pierde por infiltraciones, derrames y evaporación, es nuevamente adicionada. Si bien esta cantidad de agua en porcentaje es minoritaria, cuando se habla del beneficio de miles de toneladas de mineral puede llegar a ser significativa. Además, si los procesos de beneficio fueran en realidad “circuitos cerrados” llegaría un punto en que el agua de proceso tendría que desalojarse o diluirse. Pues se acumularía una gran cantidad de contaminantes, los cuales interferirán en la recuperación de los minerales, a menos de que existiera un tratamiento fisicoquímico de por medio.

Esta nueva adición de agua diluye los contaminantes presentes en el agua de proceso, lo que beneficia en gran medida la recuperación de los minerales. Pero también evita que las empresas mineras inviertan grandes sumas de dinero en tratamientos para reciclar totalmente el agua, lo que aumentaría los costos de extracción de una onza de oro o de cualquier otro metal. Bajo este escenario no es ilógico pensar que uno de los atractivos para invertir en la minería mexicana tiene que ver con las ventajas que la legislación en materia de agua brinda a las empresas nacionales y transnacionales.

La minería es una de las actividades industriales que utiliza grandes cantidades de sustancias químicas en varios de sus procesos, como la explotación, la flotación y la lixiviación. En especial, la flotación es el proceso minero que mayor variedad de sustancias químicas utiliza. De acuerdo con la legislación mexicana, las sustancias listadas en el Primer y Segundo Listado de Actividades Altamente Riesgosas que se manejen por arriba de los límites establecidos, ameritan evaluación del riesgo. El hecho de que sólo las sustancias contenidas en estos listados sean objeto de estudios de análisis de riesgo limita a las autoridades a solicitar que otras sustancias químicas de naturaleza desconocida sean evaluadas dentro de estos estudios. Esta regulación es muy elocuente con la lógica del enfoque de riesgo tradicional, que insta a no regular ninguna sustancia química a menos

que en la práctica se demuestre que es peligrosa. Bajo este enfoque, las empresas pueden manejar un sinnúmero de sustancias químicas de toxicidad desconocida sin restricción alguna, mientras no formen parte de estos listados, tal es el caso de los xantatos. Sustancias que en México no son vistas como tóxicas, en tanto que en Australia son consideradas sustancias prioritarias por la Ley de Productos Químicos Industriales (Notificación y Evaluación) (1989).

Sin duda, otra de las sustancias químicas más controversiales que se utiliza en la minería es el cianuro de sodio. Las cualidades de este lixivante llevadas al ámbito económico y ambiental dejan entrever conclusiones interesantes. En primera instancia, desde el punto de vista químico es el mejor lixivante que hasta la fecha se ha ensayado. Su eficiencia ha facilitado que las empresas procesen miles de toneladas de minerales con concentraciones de metales preciosos bajas a costos relativamente bajos, con lo cual han incrementado sus ganancias. Pero a la vez la toxicidad de este lixivante y su uso en grandes cantidades en reactores abiertos al ambiente (lixiviación en pilas) ha contribuido a degradar el ambiente. A diferencia de otros lixivantes estudiados como el tiosulfato de sodio, cuya reacción es más compleja y requiere de tanques especializados, la reacción con cianuro de sodio es relativamente sencilla y fácil de operar. Mientras existan yacimientos de oro y plata procesables con cianuro y técnicas relativamente sencillas, y la legislación no restrinja el uso de este reactivo o encause la investigación sobre otros lixivantes menos tóxicos, las empresas seguirán extrayendo metales preciosos por esta vía. Minerales más complejos como los telururos de oro y plata que son más difíciles de procesar por cianuración simple, no son atractivos aún para las empresas mineras, pues los costos de procesamiento no son tan redituables como otros minerales menos complejos.

Una revisión de la legislación ambiental en materia de manejo de químicos concluye tres aspectos: i) en otros países existen legislaciones más avanzadas cuyas disposiciones no son contempladas en México, pese a que los procesos mineros guardan perspectivas semejantes; ii) la legislación no busca presionar hacia cambios tecnológicos menos contaminantes, sólo regula los procesos que las empresas mineras desarrollan en la actualidad; y iii) la legislación evita regular muchos procesos que son comprobadamente

tóxicos, su acción sólo se reduce a regular los más evidentes, con lo cual la degradación ambiental continua en aumento. Un ejemplo claro se encuentra en la NOM-155-SEMARNAT-2007 que sólo regula los complejos débiles de cianuro y no los complejos fuertes, si bien estos últimos son menos tóxicos, no dejan de representar un peligro para el ambiente.

Respecto al manejo de jales en México, la tecnología empleada no ha cambiado mucho a lo largo de décadas, el concepto de presas de jales se conserva, aunque estas estructuras hayan adoptado nuevas tecnologías para su monitoreo, como es el caso de las estaciones robóticas para medir los movimientos superficiales. La NOM-141-SEMARNAT-2003 encargada de regular las presas de jales entre otros aspectos, se encuentra detrás de las nuevas tecnologías. Esta norma permite que las cortinas de las presas de jales se construyan con los mismos jales, a la par que estos residuos ingresan. No considera que se manejan jales con altos contenidos de agua, más pesados que la propia agua, los cuales son considerados una fuente potencial de accidentes.

Dicha norma tampoco considera encausar a las empresas a utilizar tecnologías de deshidratación de jales, las cuales permiten una mayor recuperación del agua de proceso y, además, llevan a los jales a una fase más manejable que disminuye significativamente los accidentes. Si bien esta tecnología es más costosa que la convencional, protege más el ambiente, pues permite que los jales filtrados pasen a la etapa de remediación casi inmediatamente. Esto se puede traducir en cierres progresivos de las instalaciones, y una disminución considerable de los impactos ambientales, dentro de los que destaca la generación de drenaje ácido. Este líquido es menos susceptible de generarse cuando se deshidratan los jales dado que se limita la entrada de oxígeno atmosférico y agua pluvial.

Por otro lado, pese a que existe toda la tecnología disponible, la NOM-141-SEMARNAT-2003 no solicita a las empresas mineras realizar pruebas de laboratorio suficientemente robustas para identificar los riesgos que los jales pudieran generar en los alrededores de las operaciones mineras y prevenir su desarrollo. Tales como la determinación del potencial de acidez a través de técnicas cinéticas, la determinación de elementos de naturaleza tóxica y no tóxica, y la caracterización mineralógica y geoquímica

de los jales. Estas pruebas pudieran fungir como base para determinar las mejores técnicas de remediación de estos residuos.

Los procesos mineros estudiados poseen variaciones que dependen en gran medida de las características de los yacimientos presentes, sin embargo, sus etapas de desarrollo se repiten como la exploración, la preparación del sitio, la explotación del mineral, la trituración y la molienda, el procesamiento de minerales y la remediación del sitio. Los impactos ambientales generados para fines de análisis y considerando las estadísticas disponibles, se pueden resumir en los grupos siguientes. El primero contempla la destrucción de los ecosistemas debido a varias acciones como el desplazamiento y la afectación de la flora y la fauna del lugar, la remoción del suelo, la extracción y consumo excesivo de agua, la modificación de la topografía, la modificación de la hidrología y la modificación del paisaje.

La cantidad de agua que utilizan las empresas mineras es variable depende de las características de sus procesos y sus minerales. Algunos datos puntuales permiten dimensionar la magnitud del suceso, por ejemplo, en una visita a la empresa minera Peñasquito, personal operativo comentó que utilizaba 2.2 m³ de agua por tonelada de mineral tratado como promedio de todos los procesos mineros desarrollados en sus instalaciones. De estos 2.2 m³, 1.7 m³ (77 %) se obtenían de los mismos procesos y 0.5 m³ (23 %) se adicionaban de alguna fuente como explotaciones subterráneas. En una primera vista pareciera que la cantidad de agua que las empresas mineras adicionan al proceso es mínima, no obstante, si se considera que se procesan miles de toneladas de mineral por día, esta cifra se vuelve significativa.

El segundo grupo de impactos ambientales abarca las emisiones a la atmósfera provenientes del uso de la energía eléctrica y del uso de combustibles fósiles. Estas emisiones pueden provenir de fuentes fijas como los hornos de fundición, o de fuentes móviles como los transportes de mineral. La SENER no posee datos exclusivos del consumo de energía para las empresas mineras, las asocia con las empresas que producen no metales. No obstante, es claro que la gran minería, por las características de sus procesos es quien consume mayor cantidad de energía. Según SENER, el consumo total de energía

en las empresas mineras, incluyendo aquellas que producen no metales, posee una tendencia al alza. Este parámetro pasó de 35.05 a 71.30 petajoules durante los años 2003 y 2017, es decir, se duplicó en un lapso de catorce años. Esta tendencia al alza en el consumo de energía es un indicativo del aumento de la producción de metales y no metales y de la generación de bióxido de carbono, un contaminante ícono de los GEI.

Las estadísticas del INEGyCEI del 2017 no presentan datos específicos de la cantidad de GEI que emite la minería del oro, de la plata, del plomo, del zinc o del cobre. Sin embargo, en este inventario se tienen dos rubros relacionados con la minería objeto de estudio: “minería (con excepción de combustibles) y cantería” y “metales no ferrosos”, los cuales muestran una tendencia al alza en la emisión de CO₂-e durante las dos primeras décadas del siglo XXI. Por ejemplo, la minería (con excepción de combustibles) y cantería aumento un 46 % sus emisiones de CO₂-e durante el periodo 2000 – 2017, en tanto que las empresas pertenecientes al grupo de metales no ferrosos también aumentaron un 13.5 % sus emisiones durante ese mismo periodo. Esto corrobora un aumento de la producción de metales durante este siglo y una mayor degradación ambiental por el aumento en la emisión de GEI.

Con datos del reporte técnico NI-43-101 y de la COA (2017) sección 6 de Minera Peñasquito, se estimó que esta empresa generó 60 tCO₂-e por kilogramo de oro durante el 2017. Esta estimación se realizó en un año donde el oro se obtuvo básicamente por flotación selectiva. El valor obtenido fue comparado con una estimación realizada por Haque y Norgate mediante el software Simapro 7.3 LCA para producir un kilogramo de oro ya refinado. El valor que obtuvieron estos autores fue de 29 tCO₂-e. En el cálculo de ambas estimaciones existieron muchas diferencias, siendo la más relevante la concentración del oro en el mineral tratado. Mientras que estos autores asumieron un valor de 2 g/t, Minera Peñasquito procesó minerales de 0.27 g/t. Este es uno de los aspectos principales por los que las tCO₂-e emitidas por Minera Peñasquito son muy superiores a las calculadas por los autores. Este hallazgo advierte que, a mayor volumen de mineral procesado con bajas concentraciones de metales, en este caso de oro, mayor es el número de tCO₂-e que se emiten al ambiente. Considerando que la gran minería procesa miles de toneladas con bajas

concentraciones de metales, este suceso supone una mayor emisión de tCO₂-e y una mayor degradación del ambiente.

El tercer grupo de impactos ambientales encierra las emisiones de materia particulada en el aire ambiente. En general, en todas las operaciones mineras es muy factible que se emita materia particulada con niveles altos de metales y metaloides como el plomo y el arsénico, que en un momento dado pueden incorporarse a los ecosistemas. Las estadísticas del SNIARN del 2016, ubican a las empresas productoras de metales y no metales en el quinto lugar en emisiones de materia particulada PM₁₀ y PM_{2.5}. Este grupo de empresas emitió el 4.5 % de PM₁₀ y el 4.0 % de PM_{2.5}, correspondientes a 8 735 y 5 083 toneladas. De manera general, desde el 2008 estos parámetros tienen una tendencia al alza. Poco puede decirse de la cantidad de metales y metaloides que se emiten al ambiente, las normas encargadas de regular dichos parámetros están a cargo de la Secretaría de Salud, y aun no se encuentran desarrolladas en su totalidad. Ni tampoco tienen la obligatoriedad de ser reportadas en el instrumento de recopilación de datos ambientales, la COA.

Finalmente, el cuarto grupo de impactos ambientales involucra las emisiones de sustancias químicas al ambiente y la generación de jales. En referencia a este último impacto, en México no existe un registro público que especifique las cantidades de jales que se producen y sus características de peligrosidad. Estos fueron separados de los residuos peligrosos industriales cuando se modificó la NOM-052-SEMARNAT-1993 para dar paso a la NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características de los residuos peligrosos (SEMARNAT, 2008). Bajo este nuevo cambio, la minería dejó de ser un sector representativo en las estadísticas de residuos peligrosos.

Por su naturaleza, las sustancias químicas emitidas en los procesos mineros poseen dos orígenes. El primero de ellos, son los propios minerales, los cuales una vez que se extraen del subsuelo y se procesan, son susceptibles de liberar una gran cantidad de metales pesados. El segundo origen de los contaminantes en la minería proviene de las sustancias utilizadas durante todo el proceso, como los explosivos utilizados para golpear y fracturar la roca, las sustancias químicas adicionadas en los procesos de concentración de

minerales, y los combustibles y la energía eléctrica empleada en el funcionamiento de la maquinaria y el equipo.

Las estadísticas de emisión de sustancias químicas por la minería en México se encuentran en el RETC. Un análisis porcentual del RETC 2017 mostró que el 99.96 % del total de sustancias químicas emitidas y transferidas, fueron emitidas al aire, donde el bióxido de carbono ocupó el 99.76 %. En el caso de la minería la situación es similar, el 99.77 % de las sustancias químicas se emitieron al aire, donde el bióxido de carbono también fue la principal sustancia emitida. Una comparación de los registros de México, Canadá y Estados Unidos muestra que existen diferencias significativas. Una de ellas, es que Canadá y Estados Unidos no consideran el bióxido de carbono dentro de los registros de emisiones y transferencia de sustancias químicas, lo cuantifican dentro de los registros de compuestos y gases de efecto invernadero. México lo considera en ambos registros. El hecho de que el RETC considere este GEI, opaca a las demás sustancias químicas y no permite sopesar a primera vista otras de interés.

En este mismo análisis, el concepto de transferencia en el NPRI de Canadá y en el RETC de México guarda diferencias significativas. La principal de ellas es que el NPRI considera a las sustancias químicas contenidas en los jales y en las rocas de deshecho como parte de este concepto, en tanto que el RETC de México no. De hecho, este registro no reporta las sustancias químicas inmersas en los jales ni en las rocas de desecho. En el NPRI (2017) este concepto fue uno de los más significativos con un valor de 21 %. El TRI de Estados Unidos también registra las sustancias químicas contenidas en los jales y en las rocas de deshecho, pero como emisiones al suelo. En el TRI (2017) este concepto tuvo un valor de 6.4 %.

Otra diferencia entre los registros es la cantidad y variedad de sustancias químicas reportadas. Mientras que en el RETC se tienen 200, en el NPRI 320 y en el TRI 695. Este último registro posee el mayor número de sustancias químicas de reporte. Si bien cada país tiene diferentes criterios para incluir nuevas sustancias en los registros, el TRI tiene mayor representación por el hecho de abarcar mayores cantidades de sustancias químicas.

Es ampliamente reconocido por la OCDE y otras organizaciones mundiales que la legislación ambiental mexicana presenta dificultades en su aplicación. Pero también como se comprueba en los párrafos anteriores, es una legislación desfasada de las nuevas tecnologías que no prevé las consecuencias ambientales del aumento en el volumen de explotación de minerales. Es una legislación que facilita la disminución de los costos operativos de las empresas mineras y sitúa a México como uno de los países latinoamericanos más atractivos para las empresas mineras extranjeras.

Por último, la principal limitación en esta investigación ha sido el acceso a la información. Gran parte de la información que las empresas mineras presentan en la COA no es publicada en las estadísticas ambientales, a pesar de que mucha de ella no posee un carácter de confidencialidad. Por ejemplo, la cantidad de agua utilizada por este sector por año y los tipos de contaminantes inmersos en este recurso durante su descarga; o los accidentes o eventos no programados más comunes de este sector durante un año corriente.

Dentro de las posibles líneas de investigación que se derivan de la presente investigación se encuentra la comparación de la legislación ambiental de México con la de otros países, en especial con la de sus socios comerciales en el nuevo Tratado entre los Estados Unidos Mexicanos, los Estados Unidos de América y Canadá (T-MEC). Esto con la finalidad de identificar las posibles mejoras que México pudiera adoptar. Otra posible línea de investigación pudiera indagar en las nuevas políticas ambientales bajo el T-MEC y el nuevo Acuerdo de Cooperación Ambiental (ACA). Finalmente, esta investigación también pudiera expandirse al estudio de otros sectores productivos.

ANEXOS

Anexo 1 Reseña de los principales eventos mineros a los que se asistió para desarrollar la presente investigación

Evento	Fecha	Institución	Objetivo
Módulos I y III del 1er Diplomado de Operaciones Mineras	18 de septiembre al 08 de diciembre de 2017	Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, UAZ Peñoles Fresnillo plc	Conocer las principales operaciones del proceso minero
XXVII Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva	23 al 27 de abril de 2018	Universidad Autónoma de Zacatecas	Conocer los principios químicos de las principales técnicas extractivas
Visita: Minera Frisco "Unidad Minera El Coronel"	17 de octubre de 2018	Minera Frisco "Unidad Minera El Coronel"	Conocer el proceso de lixiviación en pilas
Conferencia: Geología y planeación de proyectos mineros Expositor: M. en C. José de Jesús Parga Pérez	20 de septiembre de 2018	Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, UAZ	Conocer las actividades de la fase de planeación de un proyecto minero
Conferencia: <i>The discovery of the Ixhuatan Au-Cu porphyry and epithermal deposits: a new metallogenic province in Chiapas</i> Expositor: Dr. Miguel Ángel Miranda Gasca	16 de octubre de 2018	Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, UAZ	Descripción de un yacimiento de Au y Cu descubierto en Ixhuatán, Chiapas
Taller sobre la química y la electroquímica de la flotación Expositor: Dr. Alejandro Uribe Salas	23 de abril de 2018	XXVII Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva	Conocer los principios químicos y electroquímicos de los procesos de flotación
Taller sobre la hidrometalurgia del oro y la plata Expositora. Dra. Fabiola Nava Alonso	24 de abril de 2018	XXVII Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva	Control de contaminantes en la hidrometalurgia del oro y la plata
Reunión Internacional de Minería 2018	Del 30 de mayo al 10 de junio de 2018	Asociación de Ingenieros de Minas Metalúrgicos y Geólogos de México	Conocer los nuevos desarrollos tecnológicos en la minería
Visita: Compañía Minera Sabinas S.A. de C.V. Lugar: Sombrerete, Zacatecas	3 y 4 de mayo de 2019	Industrias Peñoles	Conocer las actividades realizadas en interior mina para explotar el mineral. Conocer las actividades desarrolladas en los procesos de trituración y molienda, y flotación selectiva para procesar minerales con contenidos de plata, plomo, cobre y zinc (plantas 1 y 2).

Evento	Fecha	Institución	Objetivo
Conferencia: Proceso de exploración Expositor: Ing. José Fernando Piñeiro, Gerente de Peñoles	21 de mayo de 2019	Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, UAZ	Exponer las particularidades de cada etapa del proceso de exploración, incluyendo el equipo utilizado.
Visita: Minera Peñasquito, Mazapil, Zacatecas	8 de agosto de 2019	Newmont - Goldcorp	Conocer el tajo de explotación, el proceso de flotación de plomo y zinc, e información general de la mina.
Estancia en el CINVESTAV unidad Saltillo, en el área de metalurgia extractiva Laboratorio: Dra. Fabiola Nava Alonso	9 al 13 de septiembre de 2019	Instituto Politécnico Nacional	Conocer el proceso de cianuración de metales pesados y sus retos ambientales. Entrevistar a académicos especialistas sobre el reciclaje del agua en la minería, y los nuevos lixiviantes.
V Seminario sobre depósito de jales en la Universidad Autónoma de Guanajuato	26 al 27 de septiembre de 2019	CAMIMEX	Conocer la problemática que enfrenta el manejo de jales en la minería de México
Convención Internacional de Minería, Acapulco, Guerrero	22 al 25 de octubre de 2019	AIMMGM	Entrevistar a proveedores de tecnología. Conocer los problemas que enfrenta la minería.

Anexo 2 Proyectos mineros en fase de producción operados por empresas de capital extranjero en México

País de origen	Empresa	Proyectos en producción	Proyectos que manifiestan extraer oro, plata, plomo, zinc o cobre
Estados Unidos	Abot Mining Co.	1	1
Canadá	Agnico-Eagle Mines Limited	4	4
Canadá	Alamos Gold Inc.	1	1
Reino Unido	Alien Metals Ltd (antes Arian Silver)	1	1
Canadá	Alio Gold Inc.	1	1
Canadá / USA	Americas Silver Corp. / US Silver and Gold Inc.	2	2
India	ArcelorMittal Steel Company N.V.	2	0
Canadá	Argonaut Gold Inc.	3	3
Canadá	Aurcana Corp.	1	1
Canadá	Aurora Royalties Inc. (Antes Amato Exploration Ltd)	1	0
Canadá / Corea	Avino Silver & Gold Mines Ltd / Samsung C & T Corp.	1	1
Canadá / Reino Unido	Bacanora Minerals Ltd	1	0
Estados Unidos	Calissio Resources Group Inc. (antes Amarium Minerals Inc.)	2	2
Canadá	Capstone Mining Corp.	1	1
Estados Unidos	Coeur Mining Inc.	2	2
Australia	Consolidated Zinc Ltd	1	1
Japón / Japón / México	Dowa Mining Co. Ltd / Sumitomo Corp. / Peñoles	1	1
Estados Unidos	Dyna Resource Inc. / 50% Goldgroup	1	1
Canadá	Endeavour Silver Corp.	3	3
Canadá	Excalibur Resources Ltd	1	1
Canadá	Excellon Resources Inc.	2	2
Canadá	First Majestic Silver Corp.	4	4
Canadá / Canadá	First Majestic Silver Corp. / Sandstorm Gold Ltd	1	1
Canadá / Canadá	First Majestic Silver Corp. / Weaton Precious Metals (Royalty)	1	1
Canadá / Canadá / Canadá	Fortuna Silver Mines Inc. / Continuum Resources Ltd. / Maverix Metals Inc.	1	1
Canadá / México	Frontera Mining Corp. / Invecture Group, S.A. de C.V.	1	1
Canadá	Gogold Resources Inc.	1	1
Estados Unidos / Perú	Gold Resource Corp. / Hochschild Mining Plc. 30%	1	1

País de origen	Empresa	Proyectos en producción	Proyectos que manifiestan extraer oro, plata, plomo, zinc o cobre
Canadá / Canadá	Goldcorp Inc. / 25 % Weaton Precious Metals	1	1
Estados Unidos	Golden Minerals Company	1	1
Canadá	Goldgroup Mining Inc.	1	1
Canadá / Canadá	Goldgroup Mining Inc. / Dyna Resources Corp.	1	1
Canadá	Great Panther Silver Ltd	3	3
Estados Unidos	Hecla Mining Company	1	1
Suiza / Francia	Holcim / La Farge	1	0
Canadá	Impact Silver Corp.	4	4
Corea / Corea / Canadá	Korea Resources / Hyundai Hysco / Camrova Resources Inc.	1	1
Francia / México	La Farge 47% / Elementia 53% (Cementos Fortaleza)	1	0
Canadá	Leagold Mining Corp.	2	2
Canadá	Mako Mining Corp. (antes Marlin Gold Mining Ltd)	1	1
Canadá	McEwen Mining Inc.	1	1
China	Mining Cimpany Daluo	1	1
Japón / México	Mitsubishi Corp. (49%) / Exportadora de Sal, S.A. de C.V. (ESSA) (51% Fi Fo Minero)	1	0
Corea	Mo-Jiaki Minerals	1	0
Chile	Molibdenos y Metales S.A.	1	0
Estados Unidos	Nyco Minerals Inc.	1	0
Canadá	Pan American Silver Corp.	1	1
Canadá / Canadá	Pan American Silver Corp. / Maverix Metals Inc.	1	1
Italia	Porfidi International S.R.L.	1	0
Canadá	Premier Gold Mines Ltd	1	1
España	Reverté Minerals	1	0
Reino Unido	Rose Petroleum Plc.	2	2
Francia	Saint Gobain	1	0
Canadá	Santacruz Silver Mining Ltd	3	3
Canadá	Sierra Metals Inc.	3	3
Japón	Sojitz Corp.	1	0
Canadá	Starcrore International Mines Ltd	1	1
Canadá	Telson Mining Corp.	2	2
Argentina - Italia	Ternium	1	0
Argentina-Italia	Ternium / Techint	1	0
Argentina - Italia / India	Ternium 50 % / Arcelormittal Steel Company N.V. 50%	1	0
China	Tianjin Binhai Harbor Port Int. Trade	1	0

País de origen	Empresa	Proyectos en producción	Proyectos que manifiestan extraer oro, plata, plomo, zinc o cobre
Canadá	Torex Gold Resources Inc.	1	1
Estados Unidos	United States Antimony Corp. (USAC)	6	3
Canadá / México	VVC Exploration Corp. / Firex, SA de CV	1	1
Canadá / México	Vane Minerals. / Ruiz Family (Met-Sin)	1	1
España	Vicrila Glass Manufacturing Co / Vidrieria y Cristaleria de Lamiaco S.A.	1	0
Totales		99	77

Fuente: elaboración propia con datos del SGM (2019b).

Anexo 3 Principales líneas de investigación en la minería 2000 - 2020

Grupo	Línea de investigación	Ocurrencias	Fuerza de enlace
1 Impacto y gestión ambiental (rojo)	Drenaje de mina ácido	45	285
	Economía ambiental	27	148
	Impacto ambiental	518	2 576
	Legislación ambiental	37	183
	Gestión ambiental	213	1 239
	Protección ambiental	119	733
	Tecnología ambiental	36	193
	Enfoque de gobernanza	26	136
	Control de la polución	77	490
	Total de ocurrencias	1 098	
2 Sociedad, economía y cambio climático (amarillo)	Cambio climático	33	182
	Estrategias corporativas	87	380
	Efectos económicos, ecológicos y sociales	314	1736
	Gestión energética	35	138
	Gases de efecto invernadero	25	120
	Uso de la tierra y su recuperación	54	276
	Total de ocurrencias	548	
3 Tecnología y seguridad (verde)	Prevención de accidentes	60	268
	Tecnología de automatización	145	306
	Salud y seguridad	48	242
	Equipos de minería	46	161
	Operaciones mineras	56	282
	Gestión de riesgos	83	451
	Desarrollo tecnológico	43	237
	Total de ocurrencias	481	
4 Gestión de los recursos minerales (azul)	Países en desarrollo	30	184
	Economía industrial	64	382
	Gestión de la innovación	34	181
	Exploración mineral	55	323
	Recursos minerales	135	744
	Políticas públicas y planificación regional	91	540
	Administración de recursos	61	392
	Total de ocurrencias	470	
5 Legislación minera (morado)	Empleo	28	152
	Regulaciones ambientales	39	225
	Gestión industrial	26	134
	Leyes y regulaciones mineras	217	985
	Sociedades e instituciones	26	149
	Total de ocurrencias	336	

Grupo	Línea de investigación	Ocurrencias	Fuerza de enlace
6 Manejo de residuos (anaranjado)	Desechos mineros	35	249
	Reciclaje	34	198
	Desechos sólidos	31	183
	Disposición final de residuos	39	263
	Gestión de residuos	62	396
	Total de ocurrencias	201	
7 Manejo del agua (azul claro)	Agua subterránea	37	225
	Gestión del Agua	51	361
	Contaminación del agua	38	273
	Calidad del agua	30	220
	Recursos hídricos	28	202
	Total de ocurrencias	184	

Fuente: elaboración propia con datos de VOSviewer versión 1.6.15.

Anexo 4 Minas con mayor producción de oro a nivel mundial

Orden	Mina	País	Empresa	Producción 2017 (toneladas)	Producción 2018 (toneladas)	Variación %
1	Grasberg	Indonesia	Gobierno de Indonesia (52.8 %) / Freeport McMoRan (48.8 %)	48.3	83.9	74
2	Muruntau	Uzbekistan	Gobierno de la Republica de Uzbekistan	61.0	61.5	1
3	Olimpiada	Rusia	Polyus Gold	36.6	41.1	12
4	Cortez	Estados Unidos	Barrick Gold Corporation	45.0	39.3	-13
5	Lihir	Papua Nueva Guinea	Newcrest mining	28.6	30.3	6
6	Pueblo Viejo	República Dominicana	Barrick Gold Corporation (60 %) / Goldcorp (40 %)	33.7	30.1	-11
7	Zarafshan	Uzbekistan	Gobierno de la Republica de Uzbekistan	30.0	30.0	0
8	Carlin	Estados Unidos	Newmont Mining Corporation	30.2	28.8	-5
9	Goldstrike	Estados Unidos	Barrick Gold Corporation	26.9	26.0	-3
10	Kibali	DR Congo	AngloGold Ashanti (45 %) / Randgold Resources (45 %) / Okimo (10 %)	18.5	25.1	35
11	Cadia Valley	Australia	Newcrest Mining	17.0	23.4	38
12	Boddington	Australia	Newmont Mining Corporation	24.5	22.1	-10
13	Canadian Malartic	Canadá	Agnico Eagle Mines (50 %) / Yamana Gold (50 %)	19.7	21.7	10
14	Kalgoorlie Super Pit	Australia	Barrick Gold Corporation (50 %) / Goldcorp (50 %)	22.9	19.5	-15
15	Detour Lake	Canadá	Detour Gold	17.8	19.3	9
16	Geita	Tanzania	AngloGold Ashanti	16.8	17.5	5
17	Veladero	Argentina	Barrick Gold Corporation (50 %) / Shandong Gold (50 %)	19.9	17.3	-13
18	Kumtor	Kyrgyzstan	Centerra Gold	17.5	16.6	-5
19	Merian	Suriname	New Mont Mining (75 %) / Gobierno de Suriname (25 %)	16.0	16.6	4
20	Yanacocha	Perú	Newmont Mining (51.35 %) / Buenaventura (43.65 %) / Sumitomo Corp. (5 %)	16.6	16.5	-1
21	Tarkwa	Ghana	Gold Fields (90 %) / Gobierno de Ghana (10 %)	17.6	16.3	-7
22	Paracatu	Brazil	Kinross Gold Corporation	11.2	16.2	45
23	Tanami	Australia	Newmont Mining Corporation	13.0	15.4	18
24	Kloof	Sudáfrica	Sibanye - Stillwater	16.4	15.3	-7
25	Cerro Negro	Argentina	Goldcorp	14.1	15.2	8
26	Tropicana	Australia	AngloGold Ashanti (70 %) / Independence Group (30 %)	14.3	14.9	5
27	La Herradura	México	Fresnillo plc	14.7	14.7	0
28	Sukan	Egipto	Centamin	16.9	14.7	-13
29	Essakane	Burkina Faso	IAMGOLD (90 %) / Gobierno de Burkina Faso (10 %)	13.4	14.0	4
30	Kupol	Rusia	Kinross Gold Corporation	16.4	14.0	-15
Total						

Fuente: Metals Focus (2019, p. 76).

Anexo 5 Fuentes de extracción y aprovechamiento de agua de Minera Peñasquito

Fuentes de extracción	Región hidrológica	Aprovechamiento anual (m ³) Puntos de origen
ST1 (Subterránea)	027-Nazas-Aguanaval	102 187.30
ST1	027-Nazas-Aguanaval	1 614 292.30
ST1	027-Nazas-Aguanaval	286 124.68
ST1	027-Nazas-Aguanaval	20 437.22
ST1	027-Nazas-Aguanaval	9 396.76
ST1	027-Nazas-Aguanaval	18 793.51
ST1	027-Nazas-Aguanaval	18 793.51
ST1	027-Nazas-Aguanaval	60 251.00
ST1	027-Nazas-Aguanaval	79 870.00
ST1	027-Nazas-Aguanaval	119 806.22
ST1	027-Nazas-Aguanaval	119 806.22
ST1	027-Nazas-Aguanaval	1 597 412.18
ST1	027-Nazas-Aguanaval	1 597 412.18
ST1	027-Nazas-Aguanaval	39 935.00
ST1	027-Nazas-Aguanaval	119 806.22
ST1	027-Nazas-Aguanaval	119 806.22
ST1	027-Nazas-Aguanaval	159 741.22
ST1	027-Nazas-Aguanaval	4 991 911.54
ST1	027-Nazas-Aguanaval	1 397 735.96
ST1	027-Nazas-Aguanaval	54 969.57
ST1	027-Nazas-Aguanaval	256 994.98
ST1	027-Nazas-Aguanaval	259 579.33
ST1	027-Nazas-Aguanaval	152 928.81
ST1	027-Nazas-Aguanaval	356 833.09
ST1	027-Nazas-Aguanaval	101 952.14
ST1	027-Nazas-Aguanaval	43 963.95
ST1	027-Nazas-Aguanaval	50 976.67
ST1	027-Nazas-Aguanaval	12 215.06
ST1	027-Nazas-Aguanaval	9 396.76
ST1	027-Nazas-Aguanaval	56 379.32
ST1	027-Nazas-Aguanaval	24 431.32
ST1	027-Nazas-Aguanaval	9 396.76
ST1	027-Nazas-Aguanaval	24 431.32
ST1	027-Nazas-Aguanaval	18 793.51
ST1	027-Nazas-Aguanaval	1 198 058.53
ST1	027-Nazas-Aguanaval	1 198 058.53
ST1	014-Nazas-Aguanaval	1 198 058.53
ST1	014-Nazas-Aguanaval	2 995 146.92

Fuentes de extracción	Región hidrológica	Aprovechamiento anual (m ³) Puntos de origen
ST1	014-Nazas-Aguanaval	838 641.09
ST1	014-Nazas-Aguanaval	718 834.87
ST1	014-Nazas-Aguanaval	718 834.87
ST1	014-Nazas-Aguanaval	718 834.87
Sumatoria de puntos de origen (sin considerar los que se repiten por ser mismos puntos de origen)		17 739 606.76

Fuente: Minera Peñasquito (2018, pp. 18-19 punto 3.1).

REFERENCIAS

- Agilent Technologies. (2018). *4210 MP-AES*. Agilent. <https://www.agilent.com/en-us/products/mp-aes/mp-aes-systems/4210-mp-aes>
- Agnico Eagle. (2017). *Annual Report 2017* (p. 160). Agnico Eagle. http://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReports/PDF/TSX_AEM_2017.pdf
- AIMMGM, (Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México). (2019). Bitácora Minera. *GEOMIMET, XLVI Época. Septiembre / Octubre 2019. No. 341*, 44–52.
- Akcil, A. (2003). Destruction of cyanide in gold mill effluents: Biological versus chemical treatments. *Biotechnology Advances*, *21*(6), 501–511. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(03\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(03)00099-5)
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, *14*(12), 1139–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Almada-Lobo, F. (2016). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, *3*(4), 16–21.
- Angove, J. (2005). Metallurgical testwork: Gold processing options, physical ore properties and cyanide management. En *Advances in gold ore processing* (1 ed., pp. 97–108). Elsevier.
- Arteaga Domínguez, E. (2019). *Entrevista sobre conflictos de las comunidades zacatecanas de Salaverna, Mazapil y La Colorada, Chalchihuites, realizada el 27 de julio de 2019*.
- Austin Powder. (2018). *Super Mexamon D. Ficha técnica*. <https://www.austinpowder.com/wp-content/uploads/2019/01/PIB-Supermexamon-D.pdf>
- Aylmore, M. G. (2005). Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores. En *Advances in gold ore processing* (1 ed., pp. 501–540). Elsevier.
- Azam, S., & Li, Q. (2010). *Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years*. 50–53.
- Bach, L., Nørregaard, R., Hansen, V., & Gustavson, K. (2016). *Review on environmental risk assessment of mining chemicals used for mineral separation in the mineral resources industry and recommendations for Greenland*.
- Badri, R., & Zamankhan, P. (2013). Sulphidic refractory gold ore pre-treatment by selective and bulk flotation methods. *Advanced Powder Technology*, *24*(2), 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2012.10.002>
- Bakewell, P. J. (1976). *Minería y sociedad en el México Colonial Zacatecas (1546-1700)* (1 ed.). Fondo de Cultura Económica.

- Bakewell, P. J. (1990). La Minería en la Hispanoamérica Colonial. En *Historia de América Latina Tomo 3* (pp. 49–91). Editorial Crítica.
<https://jorgecaceresr.files.wordpress.com/2010/05/tomo-3.pdf>
- Barraguer, X. M. (2016). Sistema de Control Distribuido. Nuevas soluciones para adaptarse a las exigencias del mercado. *Industria Química*, 39, 38–42.
- Bergh, L. (2011). Special issue on automation in mining, minerals and metal processing. *Journal of Process Control*, 21(2), 209–210.
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.11.014>
- Bernstein, M. D. (1964). *The Mexican Mining Industry 1890-1950*. State University of New York.
- Blight, G. E. (1998). Construction of tailings dams. En *Case studies on tailings management* (pp. 9–10). <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26442>
- BMNT, (Austrian Federal Ministry of Sustainability and Tourism). (2019). *World Mining Data 2019* (Vol. 34). BMNT. <http://www.wmc.org.pl/?q=node/49/>
- Botz, M. M., Mudder, T. I., & Akcil, A. U. (2005). Cyanide treatment: Physical, chemical and biological processes. En *Advances in gold ore processing* (1 ed., pp. 672–702). Elsevier.
- Boudia, S. (Ed.). (2014). Chapter 4 Managing Scientific and Political Uncertainty Environmental Risk Assessment in a Historical Perspective. En *Powerless science? Science and politics in a toxic world* (pp. 95–112). Berghahn Books.
- Boudia, S., & Jas, N. (Eds.). (2014). Introduction. The Greatness and Misery of Science in a Toxic World. En *Powerless science? Science and politics in a toxic world* (pp. 1–26). Berghahn Books.
- Bowen, A., & Stern, N. (2010). *Environmental policy and the economic downturn*. Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper No. 18 Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper No. 16. <http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2014/02/WorkingPaper16.pdf>
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>
- Brading, D. A. (1975). *Mineros y comerciantes en el México borbónico (1763-1810)* (1 ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Braverman, H. (1984). *Trabajo y Capital Monopolista. La degradación del trabajo en el siglo XX* (4 ed.). Nuestro Tiempo.
- Butterman, W. C., & Amey III, E. B. (2005). *Mineral Commodity Profiles Gold*. U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-303/OFR_02-303.pdf

- Butterman, W. C., & Hilliard, H. E. (2005). *Mineral Commodity Profiles Silver*. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1251/2004-1251.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2009). *Informe anual 2009. Situación de la minería mexicana en 2008*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/3414/3700/5364/2009.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2010). *Informe anual 2010. Situación de la minería mexicana en 2009*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/6814/3700/5364/2010.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2011). *Informe anual 2011. Situación de la minería mexicana en 2010*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/9914/3700/5365/2011.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2012). *Informe anual 2012. Situación de la minería mexicana en 2011*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/6414/3700/5395/2012.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2013). *Informe anual 2013. Situación de la minería mexicana en 2012*. CAMIMEX. <https://camimex.org.mx/files/1314/3700/5417/02situacion2013.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2014). *Informe anual 2014. Situación de la minería mexicana en 2013*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/8914/3700/5440/2014.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2015). *Informe anual 2015. Situación de la minería en México en 2014*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/4614/3916/7952/Info2015.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2016). *Informe anual 2016. Situación de la minería en México en 2015*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/3614/6852/9181/02-Situacioin2016.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2017a). *Informe anual 2017. Estadísticas*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/2615/0092/9348/05-Info17.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2017b). *Informe anual 2017. Situación de la minería en México en 2016*. CAMIMEX. <https://www.camimex.org.mx/files/9515/0058/4028/02-Info17.pdf>
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2018a). *Informe anual 2018. Informe de los grupos de productores*. CAMIMEX. https://www.camimex.org.mx/files/3215/3065/3264/07_info_2018.pdf
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2018b). *Informe anual 2018. Situación de la minería en México en 2017*. CAMIMEX. https://www.camimex.org.mx/files/4415/3073/8309/02_info_2018.pdf
- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2019a). *Informe anual 2019. Estadísticas*. CAMIMEX. https://camimex.org.mx/files/9215/6259/8398/05_info_2019.pdf

- CAMIMEX, (Cámara Minera de México). (2019b). *Informe anual 2019. Situación de la minería en México en 2018*. CAMIMEX.
https://camimex.org.mx/files/4415/6262/3084/02_info_2019.pdf
- Carabias, J., & Provencio, E. (1994). La política ambiental mexicana, antes y después de Río. En *La diplomacia ambiental: México y la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo* (pp. 393–423). Fondo de Cultura Económica.
- Carabias, J., & Rabasa, A. (2017). Cien años de políticas y normatividad ambiental. En *Cien ensayos para el centenario* (1 ed., Vol. 3, pp. 49–67). UNAM.
<https://biblio.juridicas.unam.mx/bjv/detalle-libro/4320-cien-ensayos-para-el-centenario-constitucion-politica-de-los-estados-unidos-mexicanos-tomo-3-estudios-economicos-y-sociales>
- Cárdenas Gracia, J. (2015). Las características jurídicas del neoliberalismo. *Cuestiones constitucionales*, 32, 3–44.
- Carmona Lara, M. del C. (1995). Análisis de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. *Derechos Humanos. Órgano Informativo de la Comisión de Derechos Humanos del Estado de México*, 1(13). <https://revistas-colaboracion.juridicas.unam.mx/index.php/derechos-humanos-emx/article/view/4596>
- Carneiro, A., & Fourie, A. (2018, abril 16). *A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia*.
https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1805_36_Carneiro
- Carrillo, A. M. (2002). Economics, politics, and public health in Porfirian Mexico (1876-1910). *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, 9, 67–87.
<https://doi.org/10.1590/S0104-59702002000400004>
- CAS, (Sociedad Americana de Química). (2015). *2015 American Chemical Society Annual Report*. <https://acswebcontent.acs.org/annualreport/2015/index.html>
- Castillo, J. M. (2017, septiembre 20). *Criterios de daño usados para prevenir el efecto de las ondas de choque y ruidos producto de las voladuras* [Curso]. Diplomado en Operaciones Mineras. Unidad Académica de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Caterpillar. (2018). Soluciones tecnológicas Cat® Minestar™. CAT.
https://www.cat.com/es_US/support/operations/technology/cat-minestar.html
- Caterpillar. (2019). *Entrevista sobre sistemas de control y automatización de Caterpillar, realizada en la Convención Internacional de Minería en Acapulco el 25 de octubre de 2019*.
- CCA, (Comisión para la Cooperación Ambiental). (2012, octubre 30). *Reunión pública anual de la CCA sobre el proyecto RETC de América del Norte*. Comisión para la Cooperación Ambiental. <http://www.cec.org/es/novedades-y->

difusion/eventos/reuni%C3%B3n-p%C3%ABlica-anual-de-la-cca-sobre-el-proyecto-retc-de-am%C3%A9rica-del-norte

- CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2018). *Perspectivas del Comercio Internacional de América Latina y el Caribe 2018: Las tensiones comerciales exigen una mayor integración regional*. CEPAL.
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/44196-perspectivas-comercio-internacional-america-latina-caribe-2018-tensiones>
- CNA, (Comisión Nacional del Agua). (2019a). *Entrevista a personal de Comisión Nacional del Agua sobre concesiones de agua, realizada en la Unidad Administrativa de Zacatecas el día 13 de agosto de 2019*.
- CNA, (Comisión Nacional del Agua). (2019b). *Entrevista a personal de Comisión Nacional del Agua sobre descargas de agua, realizada en la Unidad Administrativa de Zacatecas el 22 de noviembre de 2019*.
- Cohen, G. A. (1978). *La teoría de la historia de Karl Marx una defensa* (1 ed.). Siglo XXI de España Editores.
- Comisión Europea. (2019). *Avances en la acción climática de América Latina: Contribuciones nacionalmente determinadas al 2019*. Programa EUROCLIMA+, Dirección General de Desarrollo y Cooperación – EuropeAid, Comisión Europea.
https://www.cepal.org/sites/default/files/pdf_estudio_avances_agosto_2019_-_21-8v2.pdf
- Comisión Reguladora de Energía. (2017). *Factor de Emisión del Sector Eléctrico Nacional*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/304573/Factor_de_Emisi_n_d_el_Sector_El_ctrico_Nacional_1.pdf
- CONACYT, C. N. de C. y T. (2017, marzo 22). *Diseñan sistema inteligente para seguridad en minas*. México Ciencia y Tecnología.
<http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/tic/13912-disenan-sistema-inteligente-para-seguridad-en-minas>
- Cooney, R. (2004). *The Precautionary Principle in Biodiversity Conservation and Natural Resource Management: An issues paper for policy-makers, researchers and practitioners*. IUCN – The World Conservation Union.
https://www.researchgate.net/publication/268036682_Biodiversity_and_the_Prec_autionary_Principle_Risk_and_Uncertainty_in_Conservation_and_Sustainable_Use
- Cordera Campos, R., & Lomelí Vanegas, L. (2005). El cambio estructural en México 1982-2004: Elementos para una evaluación. *Economía Informa*, 336, 5–21.
- Corona Esquivel, R., Tritlla, J., Benavides Muñoz, M. E., Piedad Sánchez, N., & Ferrusquía Villafranca, I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1), 141–160. <https://doi.org/10.18268/BSGM2006v58n1a5>

- Coulson, M. (2011). *Insider's Guide to the Mining Sector: An In-Depth Study Of Gold And Mining Shares*. Harriman House.
<http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3299702>
- Crespo, T., Gomez-Ortiz, D., & Martín-Velázquez, S. (2019). *Geoenvironmental Characterization of Sulfide Mine Tailings* (pp. 1–25).
<https://doi.org/10.5772/intechopen.84795>
- Critchley, L. (2019, enero 3). *Where Nanotechnology, the IoT, and Industry 4.0 Meet*. Mouser Electronics. <https://www.mouser.com/blog/where-nanotechnology-the-iot-and-industry-40-meet>
- Csavina, J., Field, J., Taylor, M. P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E. A., & Sáez, A. E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of The Total Environment*, 433, 58–73.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013>
- Dassault Systèmes. (2018). GEOVIA™—Software de modelado 3D - Dassault Systèmes®. Dassault Systèmes. <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/geovia/>
- Datamine. (2018). *Datamine en MINEX CIS 2018*. Datamine.
<http://www.dataminesoftware.com/2018/06/04/newsletter-minex-cis-2018-spanish/>
- Davies, M. C. R. (2011). *Filtered dry stacked tailings: The fundamentals*.
<https://doi.org/10.14288/1.0107683>
- Davies, R. (2015). Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. *Briefing - European Parliamentary Research Service*, 1–10.
- Delgado Wise, R., & Del Pozo Mendoza, R. (2001, junio). Minería, Estado y gran capital en México. *Economía e Sociedad*, 16, 105–127.
- DGIRA, (Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental). (2010). *Resolutivo de la manifestación de impacto ambiental de Minera Tayahua*. SEMARNAT.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/zac/resolutivos/2009/32ZA2009M0003.pdf>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1910). *Ley de Aprovechamiento de Aguas de Jurisdicción Federal de 1910*.
https://siaps.colmex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=70:evolucion-de-la-legislacion-de-aguas-en-mexico&catid=49:legislacion-del-agua&Itemid=95
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1917). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/cpeum/CPEUM_orig_05feb1917_i ma.pdf

- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1926). *Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos*.
https://www.dof.gob.mx/index_113.php?year=1926&month=06&day=08
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1929). *Ley de Aguas de Propiedad Nacional*.
https://siaps.colmex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=70:evolucion-de-la-legislacion-de-aguas-en-mexico&catid=49:legislacion-del-agua&Itemid=95
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1934). *Ley de Aguas de Propiedad Nacional*.
<http://www.dof.gob.mx/index.php?year=1934&month=8&day=31>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1955). *Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos*. <https://www.dof.gob.mx/index.php?year=1955&month=03&day=01>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1961). *Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en materia explotación y aprovechamiento de recursos minerales*.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1972). *Ley Federal de Aguas*.
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=1972&month=01&day=11>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1973). *Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos*. <http://dof.gob.mx/index.php?year=1973&month=03&day=13>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1975). *Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en materia minera*.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1983a). *Decreto de reforma y adición del artículo 25 Constitucional*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/dof/CPEUM_ref_102_03feb83_ima.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1983b). *Plan Nacional de Desarrollo 1983-1988*.
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/compila/pnd.htm>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1987). *Decreto por el cual se reforma el párrafo tercero del artículo 27; y se adiciona una fracción XXIX-G al artículo 73 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*.
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=1987&month=08&day=10>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1990a). *Acuerdo por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 5 fracción X y 146 de la LGEEPA; 27 fracción XXXII y 37 fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expiden el primer listado de actividades altamente riesgosas*.
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=1990&month=03&day=28>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1990b). *Programa Nacional de Modernización de la Minería 1990-1994*.
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=1990&month=06&day=07>

- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1992a). *Acuerdo por el que las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 5 fracción X y 146 de la LGEEPA; 27 fracción XXXII y 37 fracciones XVI y XVII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, expiden el segundo listado de actividades altamente riesgosas.*
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=1992&month=05&day=04>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1992b). *Ley Minera.*
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lmin/LMin_orig_26jun92_ima.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1993a). *Decreto de promulgación del Tratado de Libre Comercio de América del Norte.*
https://www.dof.gob.mx/index_111.php?year=1993&month=12&day=20
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1993b). *Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte.*
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4815067&fecha=21/12/1993
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1996a). *NOM-048-SSA1-1993, Que establece el método normalizado para la evaluación de riesgos a la salud como consecuencia de agentes ambientales.*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4865124&fecha=09/01/1996
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1996b). *Decreto que reforma, adiciona y deroga diversas disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.* <http://www.dof.gob.mx/index.php?year=1996&month=12&day=13>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1997). *NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (1999). *DECRETO por el que se declara la adición de un párrafo quinto al artículo 4o. Constitucional y se reforma el párrafo primero del artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.*
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=1999&month=06&day=28>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2003a). *Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional de Desarrollo Minero.* dof.gob.mx/nota_to_doc.php?codnota=687950
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2003b). *Programa Nacional de Desarrollo Minero 2001—2006.*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=687951&fecha=24/11/2003
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2004). *NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales.*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004

- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2005a). *Ley de Biodiversidad de Organismos Genéticamente Modificados*.
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBOGM.pdf>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2005b). *Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Minera*.
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lmin.htm>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2009). *Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012*. http://dof.gob.mx/index_111.php?year=2009&month=08&day=28
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata*.
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=2010&month=01&day=15&edicion=MA>
T
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2011). *NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5206928&fecha=30/08/2011
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2012a). *Ley de Expropiación*.
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/35.pdf>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2012b). *Decreto por el que se Declara reformado el párrafo quinto y se adiciona un párrafo sexto recorriéndose en su orden los subsecuentes, al artículo 4o. De la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. <https://www.dof.gob.mx/index.php?year=2012&month=02&day=08>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2013a). *Acuerdo por el que se expide la Estrategia Nacional de Cambio Climático*.
http://www.dof.gob.mx/index_111.php?year=2013&month=06&day=03
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2013b). *Ley Federal de Responsabilidad Ambiental*.
<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFRA.pdf>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2014a). *NOM-165-SEMARNAT-2013, Que establece la lista de sustancias sujetas a reporte para el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5330750&fecha=24/01/2014
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2014b). *NOM-010-STPS-2014, Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral—Reconocimiento, evaluación y control*.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342372&fecha=28/04/2014
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2014c). *Ley Minera*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_240117.pdf

- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2014d). *Reglamento de la Ley General de Cambio Climático en materia del Registro Nacional de Emisiones*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGCC_MRNE_281014.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2014e). *Reglamento de la Ley Minera*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LMin_311014.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2014f). *Reglamento de Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MRETC_311014.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2015). *Acuerdo por el que se da a conocer el instructivo y formato de la Cédula de Operación Anual*.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5404075&fecha=14/08/2015
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2016a). *Ley de Aguas Nacionales*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2016b). *Decreto por el que se aprueba el Acuerdo de París, adoptado en la Ciudad de París, Francia, el 12 de diciembre de 2015*.
https://dof.gob.mx/index_111.php?year=2016&month=09&day=17
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2017). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_240117.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018a). *PROYECTO de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales para quedar como proyecto de modificación de la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510140&fecha=05/01/2018
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018b). *Ley General de Vida Silvestre*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/146_190118.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018c). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_190118.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018d). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS_050618.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018e). *Ley Federal sobre Metrología y Normalización*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/130_150618.pdf

- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018f). *Ley Agraria*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/13_250618.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018g). *Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley General de Cambio Climático*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgcc/LGCC_ref09_13jul18.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018h). *Ley General de Cambio Climático*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2018i). *Ley Federal de Derechos*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107_281218.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2019a). *DECLARATORIA de libertad de terreno número 01/2019*.
<https://www.dof.gob.mx/index.php?year=2019&month=02&day=19>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2019b). *Acuerdo por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2019, en términos del último párrafo del artículo 231 de la Ley Federal de Derechos vigente*.
<https://dof.gob.mx/index.php?year=2019&month=03&day=29&edicion=MAT>
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2019c). *Código Penal Federal*.
http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/9_120419.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2019d). *Ley Orgánica de la Administración Pública Federal*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_240117.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2019e). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_090819.pdf
- DOF, (Diario Oficial de la Federación). (2019f). *Acuerdo por el que se establecen las bases preliminares del Programa de Prueba del Sistema de Comercio de Emisiones*.
https://www.dof.gob.mx/index_111.php?year=2019&month=10&day=01
- Dou, S., Liu, J., Xiao, J., & Pan, W. (2020). Economic feasibility valuing of deep mineral resources based on risk analysis: Songtao manganese ore—China case study. *Resources Policy*, 66, 101612. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101612>
- Dyno Nobel. (2018, octubre 25). *DigiShot Plus 4G Electronic Initiation System*. Dyno Nobel. <https://www.dynonobel.com/south-america/resource-hub/publications/product-brochures?page=2>
- Dyno Nobel. (2019). *Entrevista sobre explosivos, realizada en la Convención Internacional de Minería en Acapulco el 24 de octubre de 2019*.
- EEA, (European Environmental Agency). (2001). *Late lessons from early warnings: The precautionary principle 1896–2000*. EEA.
http://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22
 pag. 12

- EEA, (European Environmental Agency). (2019, mayo 7). *Glossary* [Folder]. EEA. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary>
- El Financiero. (2019, marzo 6). Congreso de Michoacán acuerda cancelar impuestos ecológicos, por Arturo Estrada. *El financiero*. <https://elfinanciero.com.mx/nacional/congreso-de-michoacan-acuerda-cancelar-impuestos-ecologicos>
- El País. (2019a, febrero 1). Así se rompió la presa de Vale en Brasil. *El País*. https://elpais.com/internacional/2019/02/01/actualidad/1549035100_931391.html
- El País. (2019b, noviembre 5). Trump notifica su portazo al Acuerdo de París contra el cambio climático, por Amanda Mars. *El País*. https://elpais.com/sociedad/2019/11/04/actualidad/1572901274_683382.html
- El Universal. (2019, julio 21). Clausuran instalaciones de Grupo México por derrame de ácido en Mar de Cortés, por Amalia Escobar. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/estados/clausuran-grupo-mexico-por-derrame-de-acido-sulfurico-en-mar-de-cortes>
- ELAW, (Alianza Mundial de Derecho Ambiental). (2010). *Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros* (1 ed.). ELAW. <https://www.elaw.org/es/content/gu%C3%AD-para-evaluar-eias-de-proyectos-mineros>
- Engels [1873-1886], F. (1961). *Dialéctica de la naturaleza*. Grijalbo.
- Engels [1876], F. (2008). El papel del trabajo en la transformación del mono en hombre (1876). En *El papel del trabajo en la transformación del mono en hombre. Manifiesto del Partido Comunista. Ideología Alemana* (1 ed., pp. 166–183). Colofón.
- Engels [1890], F. (2001). *Carta a J. Bloch*. Archivo Marx/Engels. <https://www.marxists.org/espanol/m-e/cartas/e21-9-90.htm>
- Engels, F. (1883, marzo 17). *Discurso ante la tumba de Marx*. Archivo Marx/Engels. <https://www.marxists.org/espanol/m-e/1880s/83-tumba.htm>
- EPA, (Environmental Protection Agency). (2017). *TRI-Listed Chemicals* [Overviews and Factsheets]. EPA. <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-listed-chemicals>
- EPA, (Environmental Protection Agency). (2019a). *Análisis Nacional del TRI del 2017*. EPA. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100WQOE.PDF?Dockkey=P100WQOE.PDF>
- EPA, (Environmental Protection Agency). (2019b). *Análisis Nacional del TRI del 2017. Comparación de los sectores industriales*. EPA. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-03/documents/sectors.pdf>
- Epiroc. (2016, enero 15). *Atlas Copco lanza el nuevo sistema de monitorización de equipos, Certiq*. Epiroc. <https://www.epiroc.com/es-mx/newsroom/2016/atlas-copco-launches-new-machine-monitoring-system-certiq>

- Epiroc. (2018). *PV-351*. Epiroc. <https://www.epiroc.com/es-mx/products/drill-rigs/surface-blasthole-drill-rigs/pv-351>
- Epiroc. (2019a). *Epiroc*. La flota sin emisiones. <https://www.epiroc.com/es-mx/innovation-and-technology/zero-emission>
- Epiroc. (2019b). *Entrevista sobre automatización, realizada en la Convención Internacional de Minería en Acapulco el 25 de octubre de 2019*.
- Erbe, H.-H., Udd, J. E., & Sasiadek, J. (2004). Mining Automation. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(5), 299–304. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)32384-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)32384-4)
- Escamilla, O., & Pineda, H. (s/f). *Historia de la Facultad de Ingeniería*. UNAM. <http://www.bienvenidafi.unam.mx/historia.html>
- European Commission. (2000). *Communication from the Commission on the precautionary principle, /* COM/2000/0001 final */*, CELEX1. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/21676661-a79f-4153-b984-aeb28f07c80a/language-es>
- European Union Agency for Network and Information Security. (2018). *ICS SCADA — ENISA*. <https://www.enisa.europa.eu/topics/critical-information-infrastructures-and-services/scada>
- Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. A. [Parvez, & Saidur, R. (2019). A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1200–1217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.264>
- Feenberg, A. (2005). Teoría crítica de la tecnología. *CTS: Revista iberoamericana de ciencia, tecnología y sociedad*, 2(5), 109–123.
- Figueroa Neri, A. (2005). Tributos ambientales en México: Una revisión de su evolución y problemas. *Boletín mexicano de derecho comparado*, 38(114), 991–1020.
- FinNotes. (2020). *All In Sustaining Cost*. FinNotes. <https://www.finnotes.org/terms/all-in-sustaining-cost>
- First Majestic Silver Corp. (2017). *Depósito de jales filtrados*. XV Taller de intercambio de experiencias SEMARNAT, PROFEPA, CNA y CAMIMEX. https://www.camimex.org.mx/files/3114/9813/9886/Pre_6.pdf
- Fitton, T., & Roshdieh, A. (2013). *Filtered tailings versus thickened slurry: Four case studies*. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1363_21_fitton
- FLSmidth. (2018a). *Automatización de laboratorios*. http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20Automation/RoboLab_Minerals_ES.ashx
- FLSmidth. (2018b). *FLSmidth—Advanced process control*. <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Electrical+and+Automation/Advanced+Process+Control/Advanced+Process+Control/ProcessExpert+Cement>

- Foladori, G. (2005). *Por una sustentabilidad alternativa* (1 ed.). Universidad Autónoma de Zacatecas. Doctorado en Estudios del Desarrollo.
- Foladori, G., & Tommasino, H. (2012). La solución técnica a los problemas ambientales. *Revista Katálysis*, 15(1), 79–83. <https://doi.org/10.1590/S1414-49802012000100008>
- Fortuna Silver Mines Inc. (2019). *United States Securities and Exchange Commission Washington, D.C. 20549 Form 40-F*. https://www.fortunasilver.com/site/assets/files/4686/form_40-f_fiscal_year_ended_31dec18_29mar19.pdf
- Foster, J. B. (2001). Capitalism's Environmental Crisis: Is Technology the Answer? *Hitotsubashi Journal of Social Studies*, 33(1), 143–150. <https://doi.org/10.15057/8304>
- Foster, J. B. (2013a, octubre 1). *The Epochal Crisis*. Monthly Review. <https://monthlyreview.org/2013/10/01/epochal-crisis/>
- Foster, J. B. (2013b, diciembre 1). *Marx and the Rift in the Universal Metabolism of Nature*. Monthly Review. <https://monthlyreview.org/2013/12/01/marx-rift-universal-metabolism-nature/>
- Fraser Institute. (2019). *Ranking minero mundial Fraser 2019*. <https://mineriadelperu.com/wp-content/uploads/2019/03/Fraiser2019.pdf>
- Fuerstenau, M. C., & Somasundaran, P. (2009). Flotation. En *Principles of Mineral Processing* (Electronic ed., pp. 1–8). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Fugiel, A., Burchart-Korol, D., Czaplicka-Kolarz, K., & Smoliński, A. (2017). Environmental impact and damage categories caused by air pollution emissions from mining and quarrying sectors of European countries. *Journal of Cleaner Production*, 143, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.136>
- Gärtner, S., Küllmer, J., & Schlottmann, U. (2003). Chemical Safety in a Vulnerable World. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 42, 4456–4469. <https://doi.org/10.1002/anie.200300584>
- Geocomunes. (2017). *Amenaza neoliberal a los bienes comunes: Panorama nacional de megaproyectos mineros*. Geocomunes. http://geocomunes.org/Analisis_PDF/Mineri%CC%81a%20A%20lectura
- Geology.com. (2019). *Uses of Zinc*. Geoscience News and Information Geology.com. <https://geology.com/usgs/uses-of-zinc/>
- Gibbons, T. (2005). International cyanide management code. En *Advances in gold ore processing* (1 ed., pp. 182–200). Elsevier.
- Goldcorp. (2018). *Peñasquito Polymetallic Operations Zacatecas State, Mexico NI 43-101 Technical Report* (p. 200). Goldcorp.

https://s22.q4cdn.com/653477107/files/doc_downloads/portfolio_docs/Goldcorp-2018-Penasquito-Tech-Report.PDF

- Goldman Sachs. (2018). *Metals: The zinc story is not over yet*. <http://cdn.ceo.ca.s3-us-west-2.amazonaws.com/1dke2is-12072018%20Metals%20-%20The%20zinc%20story%20is%20not%20over%20yet%20%28002%29.pdf>
- Gómez de Silva Cano, J. J. (2016). *El derecho agrario mexicano y la Constitución de 1917* (1 ed.). Instituto de Investigaciones Jurídicas UNAM. <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/9/4452/19.pdf>
- Gómez Hernández, S. (2020, agosto 21). *Uso racional del agua en las plantas de Fresnillo plc*. 2da. Jornada del Procesamiento de Minerales, Clúster Minero de Zacatecas. <https://clusmin.org/uso-del-racional-del-agua-en-las-plantas-concentradoras-de-fresnillo-plc/>
- Gómez Urrutia, N. (2018, junio 28). México frente a la cuarta revolución industrial. *La Jornada*. <http://www.jornada.unam.mx/2018/06/28/opinion/018a1pol>
- González Pineda, P. (2020, agosto 19). *Migración de presa de jales a depósito de jales secos*. 2da. Jornada del Procesamiento de Minerales, Clúster Minero de Zacatecas. <https://clusmin.org/webinar-migracion-de-presa-de-jales-a-deposito-de-jales-secos/>
- González Rodríguez, J. de J. (2011). *Minería en México. Referencias generales, régimen fiscal, concesiones y propuestas legislativas. Documento de Trabajo núm. 121*. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. <http://www3.diputados.gob.mx/camara/content/view/full/258443>
- Government of Canada, (Environment and Climate Change). (2011). *Guide for Reporting to the National Pollutant Release Inventory (NPRI) 2016 and 2017. Canadian Environmental Protection Act, 1999 (CEPA)*. ECCC. <https://www.ec.gc.ca/inrp-npri/28C24172-53CB-4307-8720-CB91EE2A6069/2016-17%20Guide%20for%20Reporting%20-%20EN.pdf>
- Government of Canada, (Environment and Climate Change). (2018, septiembre 13). *Pre-defined queries. Highest On-site Substance Releases, by Quantity*. Government of Canada. https://pollution-waste.canada.ca/national-release-inventory/archives/index.cfm?do=common&common_query=0&lang=En
- Government of Canada, (Environment and Climate Change). (2019, noviembre 21). *Tailings and waste rock: Guide to reporting*. Government of Canada.
- Government of Canada, (Environment and Climate Change). (2020, febrero 5). *Canada's National Pollutant Release Inventory: Data highlights 2017*. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/national-pollutant-release-inventory/tools-resources-data/fact-sheet.html>
- Greengard, S. (2015). *The Internet of Things*. MIT Press.

- Guanira, K., Valente, T. M., Ríos, C. A., Castellanos, O. M., Salazar, L., Lattanzi, D., & Jaime, P. (2020). Methodological approach for mineralogical characterization of tailings from a Cu(Au,Ag) skarn type deposit using QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy). *Journal of Geochemical Exploration*, 209, 106439. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106439>
- Guerrero-Flores, A. D., Uribe-Salas, A., Dávila-Pulido, G. I., & Flores-Álvarez, J. M. (2018). Simultaneous removal of calcium and sulfate ions from flotation water of complex sulfides. *Minerals Engineering*, 123, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.024>
- Gupta, A., & Yan, D. S. (2006). Flotation. En *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction* (1 ed., pp. 555–603). Elsevier.
- Gupta, C. K., & Mukherjee, T. K. (1990). *Hydrometallurgy in Extraction Processes* (1 ed., Vol. 2). CRC Press, Inc.
- Gutiérrez Pérez, V. H. (2019, noviembre 15). *Los efectos del agua de proceso en la flotación selectiva*. VII Seminario Técnico Flottec 2019.
- Habashi, F. (1992). Extractive Metallurgy Today, Progress and Problems. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 8, 17–33. <https://doi.org/10.1080/08827509208952675>
- Habashi, F. (2012). A review. Pollution problems of the metallurgical industry. *Rev. Del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 15(29), 49–60.
- Haldar, S. K. (2013). *Mineral Exploration: Principles and Applications* (1 ed.). Elsevier.
- Han, K. N., & Fuerstenau, M. C. (2009). Introduction. En *Principles of Mineral Processing* (Electronic ed., pp. 1–8). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Haque, N., & Norgate, T. (2014). The greenhouse gas footprint of in-situ leaching of uranium, gold and copper in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 84, 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.033>
- Harvey, D. (2007). *Breve historia del neoliberalismo* (1 ed.). Ediciones Akal.
- Heinrich, M. (2013). The ‘Fragment on Machines’: A Marxian Misconception in the Grundrisse and its Overcoming in Capital. En *In Marx’s Laboratory. Critical Interpretations of the Grundrisse* (Vol. 48, pp. 197–212). Brill. <https://libcom.org/files/In%20Marx's%20Laboratory%20-%20Critical%20Interpretations%20of%20the%20Grundrisse.pdf>
- Henckens, M. L. C. M., Ierland, E. C. [van, Driessen, P. P. J., & Worrell, E. (2016). Mineral resources: Geological scarcity, market price trends, and future generations. *Resources Policy*, 49, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.012>
- Henckens, M. L. C. M., Ryngaert, C. M. J., Driessen, P. P. J., & Worrell, E. (2018). Normative principles and the sustainable use of geologically scarce mineral resources. *Resources Policy*, 59, 351–359. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.08.007>

- Hresc, J., Riley, E., & Harris, P. (2018). Mining project's economic impact on local communities, as a social determinant of health: A documentary analysis of environmental impact statements. *Environmental Impact Assessment Review*, 72, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.009>
- Ibarra Barreras, M. F., & Moreno Vázquez, J. L. (2017). La justicia ambiental en el Río Sonora. *RevIISE: Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 10(10), 135–155.
- ILA, (International Lead Association). (2015). *Lead Action 21*. https://www.ila-lead.org/UserFiles/File/ILA9927%20FS_Recycling_V08.pdf
- ILZSG, (International Lead and Zinc Study Group). (2019). *Statistics*. ILZSG. <http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=3>
- INECC, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2012). *Inventario Nacional de Sustancias Químicas Base 2009*. SEMARNAT. <https://www.crim.unam.mx/web/node/585>
- INECC, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2014). *Actualización del Inventario Nacional de Sustancias Químicas 2010-2013*. SEMARNAT. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191430/2014_Actualizaci_n_d el_inventario.pdf
- INECC, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2018a). *Costos de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas de México. Medidas Sectoriales No Condicionadas. Informe final*. INECC. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/330857/Costos_de_las_contribuciones_nacionalmente_determinadas_de_M_xico__dobles_p_ginas_.pdf
- INECC, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2018b). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. Capítulo: Energía. Documento de la metodología del INEGYCEI 1990-2015*. INECC. https://www.snieg.mx/DocumentacionPortal/iin/Acuerdo_5_II_2014/Anexos_INEGYCEI_1990-2015-f.pdf
- INECC, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2018c). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) (varios años)*. datos.gob. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- INECC, (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2018d). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI)—2017*. datos.gob. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei/resource/b81c08ef-fd45-498f-8c7c-67c35992577d>
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (s/f). *Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte 2018 (SCIAN 2018)*. INEGI. Recuperado el 13 de marzo de 2019, de <https://www.inegi.org.mx/app/scian/>

- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). *Estadísticas históricas de México 2009*. INEGI.
http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/historicas10/EHM2009.pdf
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2015). *División municipal. Coahuila de Zaragoza*. Cuéntame.
http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/coah/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=05
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2018, agosto 31). *Estadística de la Industria Minerometalúrgica (EIMM)*. gob.mx.
<https://datos.gob.mx/busca/dataset/estadistica-de-la-industria-minerometalurgica-eimm>
- INFONOR. (2016, octubre 20). *Sin cambio consumo y extracción de agua en Saltillo por Juan Manuel Contreras*. INFONOR Diario Digital - Sureste y Laguna.
<https://www.infonor.com.mx/index.php/sureste/6-sureste-y-laguna/73877-sin-cambio-consumo-y-extracci%C3%B3n-de-agua-en-saltillo>
- International Mining. (2018, marzo 8). *Newtrax selected by Fresnillo mine for safety and productivity solutions*. International Mining. <https://im-mining.com/2018/03/08/newtrax-selected-fresnillo-mine-safety-productivity-solutions/>
- International Society of Explosives Engineers. (2007). *Manual del Especialista en Voladura* (17 ed.). International Society of Explosives Engineers.
- IOMC, (Programa Inter organizacional para el Manejo Adecuado de las Sustancias Químicas). (2008). *Estrategia del IOMC para el fortalecimiento de las capacidades nacionales de gestión de los productos químicos. Para su presentación a la ICCM-2*. IOM. http://origin.who.int/iomc/publications/strategy_spanish.pdf
- Jamieson, H. (2013). ChemInform Abstract: Geochemistry and Mineralogy of Solid Mine Waste: Essential Knowledge for Predicting Environmental Impact. *ChemInform*, 44, 381–386. <https://doi.org/10.1002/chin.201304166>
- Jartti, T., Litmanen, T., Lacey, J., & Moffat, K. (2020). National level paths to the mining industry's Social Licence to Operate (SLO) in Northern Europe: The case of Finland. *The Extractive Industries and Society*, 7(1), 97–109.
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.01.006>
- JIAPAZ, (Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas). (2019a). *Datos generales de las plantas de tratamiento a cargo de JIAPAZ*. Dirección de Distribución, Alcantarillado y Saneamiento, Departamento de Calidad del Agua y Saneamiento.
- JIAPAZ, (Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas). (2019b). *Entrevista a personal de JIAPAZ sobre plantas de tratamiento de agua, realizada el 20 de diciembre de 2019 en JIAPAZ, Guadalupe, Zacatecas*.

- Johnson, C. A. (2015). The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective. *Applied Geochemistry*, 57, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.05.023>
- Johnson, C. A., Grimes, D. J., Leinz, R. W., Breit, G. N., & Rye, R. O. (2001). The critical importance of strong cyanocomplexes in the remediation and decommissioning of cyanidation heap leach operations. En *Cyanide: Social, industrial, and economic aspects* (pp. 35–49). Minerals, Metals & Materials Society.
- Jordan, A., & O’Riordan, T. (2004). The precautionary principle: A legal and policy history. En *The precautionary principle: Protecting public health, the environment and the future of our children*. World Health Organization. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/91173/E83079.pdf
- Juárez Villaseñor, J., Olaiz y Pérez, A., & Grijalva Vega, A. (2015). Ley Federal de Aguas: Antecedentes, reformas y aplicación. *Tecnología y ciencias del agua*, 58–64.
- Kagermann, H. (2015). Change through digitization: Value creation in the Age of Industry 4.0. *Management of Permanent Change*, 23–45. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_2
- Kanazawa, Y., & Kamitani, M. (2006). Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys and Compounds*, 408–412, 1339–1343. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.033>
- Kappes, D. W. (2005). Heap leaching of gold and silver ores. En *Advances in gold ore processing* (1 ed., pp. 456–478). Elsevier.
- Katz, C. (1996). La concepción marxista del cambio tecnológico. *Revista Buenos Aires. Pensamiento Económico*, 1, 155–180.
- Katz, C. (1999). La tecnología como fuerza productiva social: Implicaciones de una caracterización. *Quipu*, 12(3), 371–381.
- Katz, C. (2015). *Neoliberalismo neodesarrollismo socialismo*. Batalla de ideas. <https://www.alainet.org/es/articulo/176213>
- Kefeni, K. K., Msagati, T. A. M., & Mamba, B. B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 151, 475–493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>
- Komatsu. (s/f). Komtrax. *Komatsu*. Recuperado el 8 de octubre de 2018, de <https://www.komatsulatinoamerica.com/mexico/experiencia-komatsu/innovacion/komtrax/>
- Komatsu. (2018). Komatsu celebra el décimo aniversario del Sistema Autónomo de Transporte (AHS) | Komatsu Chile. *Komatsu*. <https://www.komatsulatinoamerica.com/chile/komatsu-celebra-el-decimo-aniversario-del-sistema-autonomo-de-transporte-ahs/>
- Kongolo, K., & Mwema, M. D. (1998). The extractive metallurgy of gold. *Hyperfine Interactions*, 111(1), 281–289. <https://doi.org/10.1023/A:1012678306334>

- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1991). *Rock Blasting and Overbreak Control*. National Highway Institute. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/012844.pdf>
- Korte, F., & Coulston, F. (1995). From Single-Substance Evaluation to Ecological Process Concept: The Dilemma of Processing Gold with Cyanide. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 32(1), 96–101. <https://doi.org/10.1006/eesa.1995.1091>
- KUPDF. (2017). *Courier 6 Sl Esp*. KUPDF. https://kupdf.net/download/courier-6-sl-esp_5c901c09e2b6f5e72a7d4b9a_pdf
- La jornada. (2018, diciembre 1). Abre planta de pirita en Zacatecas, por Alfredo Valadez Rodríguez. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2018/12/01/estados/029n3est>
- La Jornada. (2019a, mayo 30). La Jornada: Tomó la Semarnat minoría depredadora y rapaz: Toledo, por Alma E. Muñoz y Alonso Urrutia. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2019/05/30/politica/007n1pol>
- La Jornada. (2019b, mayo 31). Peñasquito y habitantes de Mazapil acuerdan negociar, por A. Valadez y C. Gómez. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2019/05/31/estados/032n4est>
- Lange, O. (1966). *Economía Política* (1 ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Lasec. (2018). *Presentación Industria 4.0 Mina Digital*.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6, 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Leapfrog. (s/f). Modelado Geológico en 3D | Modelado Implícito | Software Geológico | Leapfrog Español. *Leapfrog*. <https://www.leapfrog3d.com/es>
- Leff, E. (2001). *Ecología y Capital* (4 ed.). Siglo veintiuno editores.
- Levay, G., Smart, R. St. C., & Skinner, W. M. (2001). The impact of water quality on flotation performance. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 101, 69–75.
- Li, J., & Zhan, K. (2018a). Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*, 4(3), 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>
- Li, J., & Zhan, K. (2018b). Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*, 4(3), 381–391. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>
- Li, P., Feng, X., Qiu, G., Shang, L., & Li, Z. (2009). Mercury pollution in Asia: A review of the contaminated sites. *Journal of hazardous materials*, 168, 591–601. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.031>

- Li, Y., Xie, S., Zhao, Y., Xia, L., Li, H., & Song, S. (2019). The Life Cycle of Water Used in Flotation: A Review. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(2), 385–397. <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0004-z>
- Liu, W., Moran, C. J., & Vink, S. (2013). A review of the effect of water quality on flotation. *Minerals Engineering*, 53, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.07.011>
- Llano, M. (2016). *Concesiones de agua para las mineras*. CartoCrítica & Fundación Heinrich Böll Stiftung. <https://mx.boell.org/es/2016/02/17/concesiones-de-agua-para-las-mineras>
- López Aburto, V. M. (1994). *Manual para la selección de métodos de explotación de minas*. División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, UNAM. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/1769>
- López-Robles, J. R., Otegi-Olaso, J. R., Gamboa-Rosales, N. K., Gamboa-Rosales, H., Robles-Berumen, H., & Gamboa-Rosales, A. (2019). *Visualizing and mapping the project management research areas within the International Journal of Project Management: A bibliometric analysis from 1983 to 2018*. <http://eprints.rclis.org/39670/>
- López-Robles, J. R., Otegi-Olaso, J. R., & Porto-Gómez, I. (2018). *Bibliometric analysis of worldwide scientific literature in Project Management Techniques and Tools over the past 50 years: 1967-2017*. https://www.researchgate.net/publication/338229925_Bibliometric_analysis_of_worldwide_scientific_literature_in_Project_Management_Techniques_and_Tools_over_the_past_50_years_1967-2017
- López-Robles, J. R., Otegi-Olaso, J. R., Porto-Gómez, I., Gamboa-Rosales, H., & Gamboa-Rosales, N. K. (2020). La relación entre Inteligencia de Negocio e Inteligencia Competitiva: Un análisis retrospectivo y bibliométrico de la literatura de 1959 a 2017. *Revista española de documentación científica*, 43(1), 4.
- López-Robles, J. R., Otegi-Olaso, J. R., Porto-Gómez, I., Gamboa-Rosales, N. K., & Gamboa-Rosales, H. (2019, noviembre 17). *Inteligencia Competitiva: Origen, evolución y tendencias*. https://www.researchgate.net/publication/337316149_Inteligencia_Competitiva_origen_evolucion_y_tendencias
- Losekann, C., Dias, T. H., & Camargo, A. V. M. (2020). The Rio Doce mining disaster: Legal framing in the Brazilian justice system. *The Extractive Industries and Society*, 7(1), 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.11.015>
- LXI Legislatura Cámara de Diputados. (2006). *Informes Presidenciales – Carlos Salinas De Gortari*. Cámara de Diputados. <http://www.diputados.gob.mx/sedia/sia/re/RE-ISS-09-06-17.pdf>
- LXI Legislatura Cámara de Diputados. (2012). *Informes Presidenciales – Miguel de la Madrid Hurtado*. Cámara de Diputados. <http://www.diputados.gob.mx/sedia/sia/re/RE-ISS-09-06-16.pdf>

- MAC. (2019). *México*. MAC: Mines and Communities.
<http://www.minesandcommunities.org/list.php?r=949>
- Macro Trends. (2018). *MacroTrends Economic Charts and Historical Data*.
<http://www.macrotrends.net/1470/historical-silver-prices-100-year-chart>
- Mactaggart, F., McDermott, L., Tynan, A., & Gericke, C. (2016). Examining health and well-being outcomes associated with mining activity in rural communities of high-income countries: A systematic review. *Australian Journal of Rural Health, 24*.
<https://doi.org/10.1111/ajr.12285>
- Madrid Ramírez, L. (2020). *El desmantelamiento del sector ambiental: Un balazo en el pie*. El Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible.
<https://www.ccmss.org.mx/acervo/el-desmantelamiento-del-sector-ambiental-un-balazo-en-el-pie/>
- Majone, G. (2010). Strategic Issues in Risk Regulation and Risk Management. En OECD (Ed.), *Risk and regulatory policy: Improving the governance of risk: Vol. Chapter 3* (pp. 93–131). OECD.
- Maptek. (2015). *Maptek Vulcan. Software de planificación minera y modelado en 3D*.
https://www.maptek.com/pdf/es/vulcan/Maptek_Vulcan_Overview_esp.pdf
- Maptek. (2018). Maptek—Planificación minera en 3D, diseño de minas, geología y programación en Vulcan. *Maptek*.
<https://www.maptek.com/cl/productos/vulcan/index.html>
- Marchant, G. E. (2003). From general policy to legal rule: Aspirations and limitations of the precautionary principle. *Environmental Health Perspectives, 111*(14), 1799–1803.
- Marini, M. (1991). *Dialéctica de la dependencia*. Ruy Mauro Marini Escritos.
http://www.marini-escritos.unam.mx/024_dialectica_dependencia.html
- Marsden, J. O., & Lain, C. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction, Second Edition: (2 ed.)*. The Society for Mining, and Exploration, Inc.
<https://www.amazon.com.mx/Chemistry-Gold-Extraction-Second/dp/0873352408>
- Marx [1844]. (2001). *Manuscritos Económicos y filosóficos de 1844. Tercer manuscrito*. Marxists. <https://www.marxists.org/espanol/m-e/1840s/manuscritos/man3.htm>
- Marx [1859], K. (2001). *Prólogo a la Contribución a la Crítica de la Economía Política*. Marxists Internet Archive. <https://www.marxists.org/espanol/m-e/1850s/criteconpol.htm>
- Marx [1861-1863], K. (1982). *Progreso técnico y desarrollo capitalista (manuscritos 1861-1863)* (1 ed.).
- Marx [1867], K. (1975a). *El Capital. Tomo I. Crítica de la economía política* (1 ed., Vol. 1). Siglo XXI Editores.
- Marx [1867], K. (1975b). *El Capital. Tomo I. Crítica de la economía política* (1 ed., Vol. 2). Siglo XXI Editores.

- Marx [1867], K. (1976). *El Capital. Tomo III. Crítica de la economía política. El proceso global de la producción capitalista* (1 ed., Vol. 6). Siglo XXI Editores.
http://marxismo.school/files/2017/09/Marx_El-capital_Tomo-3_Vol.-6.pdf
- Marx [1867], K. (1981). *El Capital. Tomo III. Crítica de la economía política. El proceso global de la producción capitalista* (1 ed., Vol. 8). Siglo XXI Editores.
- Marx [1867], K. (1988). *El Capital. Tomo I. Crítica de la economía política* (2 ed., Vol. 3). Siglo XXI Editores. http://marxismo.school/files/2017/09/Marx_El-capital_Tomo-1_Vol.-3.pdf
- Marx [1875], K. (1977). *Crítica del Programa de Gotha*. Editorial Progreso.
<http://archivo.juventudes.org/textos/Karl%20Marx/Critica%20del%20programa%20de%20Gotha.pdf>
- Marx, K., & Engels [1846], F. (1974). *La ideología alemana* (5 ed.). Ediciones Grijalbo.
- McLean, C., & Patterson, A. (2012). *The Precautionary Principle in International Relations: Constructing Foreign and Defense Policy in an Age of Uncertainty*. Edwin Mellen Press. <http://0-search.ebscohost.com/millennium.itesm.mx/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=492834&lang=es&site=ehost-live>.
- MEND Project, (Mine Environment Neutral Drainage). (2017). *Study of Tailings Management Technologies. MEND report 2.50.1*. <http://mend-nedem.org/mend-report/study-of-tailings-management-technologies-2017/>
- Metals Focus. (2018). *Precious Metals Investment Focus 2017/2018*. Metals Focus.
<https://www.degussa-goldhandel.de/wp-content/uploads/2017/10/precious-metals-investment-focus-2017-2018.pdf>
- Metals Focus. (2019). *Gold Focus 2019*. Metals Focus.
<https://www.europeangoldforum.org/wp-content/uploads/sites/8/2019/04/Gold-Focus-2019-compressed.pdf>
- Milenio. (2019, julio 29). *Van en Morena por ley minera más severa, por Angélica Mercado*. <https://www.milenio.com/politica/van-en-morena-por-ley-minera-mas-severa>
- MINEO Consortium. (2000). *Review of potential environmental and social impact of mining. Part 2*. http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/rs_2004_24.pdf
- Minera Agnico Eagle. (2007). *Manifestación de impacto ambiental modalidad particular Agnico Eagle México, Proyecto "Pinos Altos"*. Sistema Nacional de Tramités. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/chih/estudios/2007/08CI2007M0001.pdf>
- Minera Frisco. (2017). *Reporte anual 2017 Minera Frisco*. Minera Frisco.
http://www.minerafrisco.com.mx/ES_Inversionistas_InformacionFinanciera_Report/Reporte%20Anual%202017.pdf

- Minera Media Luna. (2011). *Manifestación de impacto ambiental modalidad particular del proyecto exploración directa minera "Morelos", Cocula, Guerrero*. Sistema Nacional de Trámite. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/gro/estudios/2011/12GE2011MD080.pdf>
- Minera Penmont. (s/f). *Manifestación de impacto ambiental Proyecto Nochebuena. Resumen ejecutivo*. Sistema Nacional de Trámite. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/son/estudios/2010/26SO2010MD081.pdf>
- Minera Peñasquito. (2006). *Manifestación de impacto ambiental modalidad regional Proyecto Minero Peñasquito Tomo 1*. Sistema Nacional de Trámite. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgiraDocs/documentos/zac/estudios/2006/32ZA2006M0002.pdf>
- Minera Peñasquito. (2008). *Manifestación de impacto ambiental modalidad regional ampliación del Proyecto Minero Peñasquito*. Sistema Nacional de Trámite. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgiraDocs/documentos/zac/estudios/2008/32ZA2008M0001.pdf>
- Minera Peñasquito. (2011). *Resumen ejecutivo: Ampliación del depósito de jales y fase II del patio de lixiviación*. Sistema Nacional de Trámite. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/zac/resumenes/2011/32ZA2011M0005.pdf>
- Minera Peñasquito. (2018). *Versión Pública Cédula de Operación Anual (COA) 2017 Minera Peñasquito S.A. de C.V.*
- Minera Peñasquito. (2019). *Visita a Minera Peñasquito ubicada en Mazapil, Zacatecas, el 8 de agosto de 2019*.
- Minera Real de Ángeles. (2005). *Manifestación de impacto ambiental unidad "El Coronel"*. Sistema Nacional de Trámite. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/zac/estudios/2005/32ZA2005M0001.pdf>
- Minera Real de Ángeles. (2011). *Manifestación de impacto ambiental unidad "El Coronel" segunda etapa*. Sistema Nacional de Trámite. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/zac/estudios/2011/32ZA2011M0002.pdf>

- Minera Saucito. (s/f). *Estudio de riesgo nivel 1 proyecto Minera Saucito. Resumen ejecutivo*. Sistema Nacional de Trámites. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/zac/estudios/2009/32ZA2009MD024.pdf>
- Minería en línea. (2019a, septiembre 23). *Newmont Goldcorp inaugura la “mina del futuro” en Ontario, Canadá*. Minería en línea. <https://mineriaenlinea.com/2019/09/newmont-goldcorp-inaugura-la-mina-del-futuro-en-ontario-canada/>
- Minería en línea. (2019b, diciembre 30). *Juez reabre investigación contra filial de Grupo México por derrame tóxico*. Minería en línea. <https://mineriaenlinea.com/2019/12/juez-reabre-investigacion-contrafilial-de-grupo-mexico-por-derrame-toxico/>
- Minería en línea. (2019c, diciembre 31). *México contempla su papel en auge del litio*. Minería en línea. <https://mineriaenlinea.com/2019/12/mexico-contempla-su-papel-en-auge-del-litio/>
- Mining & Civil Engineering. (2018). *Mobilaris Mining Intelligence™ just like Google for your mine*. Mobilaris. <https://www.mobilaris.se/mining-civil-engineering/real-time-situational-awareness/>
- Mining & Construction. (2014). *Atlas Copco Enabling Automation—Rig Control System*. Mining & Construction. <https://miningandconstruction.com/mining/enabling-automation-2748/>
- Miranda Gasca, M. Á. (2018, octubre 16). *The discovery of the Ixhuatán Au-Cu Porphyry and epithermal deposits: A new metallogenic province in Chiapas*.
- Moore, J., & Pérez Rocha, M. (2019). *Casino del extractivismo*. <https://movimientom4.org/2019/06/presentacion-del-informe-el-casino-del-extractivismo/>
- Mudd, G. M. (2007). Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability. *Resources Policy*, 32(1), 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2007.05.002>
- Mudd, G. M. (2010). The Environmental sustainability of mining in Australia: Key megatrends and looming constraints. *Resources Policy*, 35(2), 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.12.001>
- Mudd, G. M. (2020). Mining and Water Resources. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12131-1>
- Müezzinoğlu, A. (2003). A Review of Environmental Considerations on Gold Mining and Production. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 33(1), 45–71. <https://doi.org/10.1080/10643380390814451>

- Muñoz Villarreal, C. (2005). *Bienes y servicios ambientales en México: Caracterización preliminar y sinergias entre protección ambiental, desarrollo del mercado y estrategia comercial*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5661>
- Nagaraj, D. R., & Farinato, R. S. (2016). Evolution of flotation chemistry and chemicals: A century of innovations and the lingering challenges. *Minerals Engineering*, 96–97, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.019>
- Nava, F. (2018). Retos actuales en la extracción de metales preciosos en México. *Universitarios Potosinos*, 221, 22–25.
- NICNAS, (National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme). (1995). *Sodium Ethyl Xanthate. Priority existing chemical no. 5*. Australian Government Publishing Service.
- Noble, D. (2017). *Forces of Production: A Social History of Industrial Automation*. Routledge.
- Norgate, T. E., Jahanshahi, S., & Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15(8), 838–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>
- Northey, S., Mudd, G., Saarivuori, E., Wessman-Jääskeläinen, H., & Haque, N. (2016). Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production*, 135, 1098–1116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.024>
- OCDE, (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). (1996). *Prevención y Control de la Contaminación. Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). Una herramienta para la política ambiental y el desarrollo sostenible. Manual Guía para los Gobiernos*. OCDE. https://www.oecd.org/env/ehs/pollutant-release-transfer-register/OECD-GD96-32_PRTR_GuidanceManual_Spanish.pdf
- OCDE, (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). (2000). Reporte sobre la capacidad del gobierno para asegurar regulaciones de alta calidad. En *Reforma Regulatoria en México* (Vol. 2, pp. 12–62). OCDE.
- OCDE, (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). (2001). *OECD Environmental Outlook for the Chemicals Industry*. OCDE. <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/oecd-environmental-outlook-1999155x.htm>
- OCDE, (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). (2010). *Risk and Regulatory Policy: Improving the Governance of Risk—OECD*. OECD. <http://www.oecd.org/gov/regulatory-policy/risk-improving-the-governance-of-risk.htm>
- OCMAL. (s/f). *Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina*. Recuperado el 10 de octubre de 2018, de <https://www.ocmal.org/>

- Odell, S. D., Bebbington, A., & Frey, K. E. (2018). Mining and climate change: A review and framework for analysis. *The Extractive Industries and Society*, 5(1), 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.12.004>
- OMC, (Organización Mundial del Comercio). (1997, octubre 2). *Exámenes de las políticas comerciales: Primer comunicado de prensa, resumen del informe de la Secretaría y del informe del gobierno. México: Octubre de 1997*. OMC. https://www.wto.org/spanish/tratop_s/tpr_s/tp063_s.htm
- OMC, (Organización Mundial del Comercio). (2015). *Entender la OMC* (5 ed.). OMC. https://www.wto.org/spanish/thewto_s/whatis_s/tif_s/understanding_s.pdf
- OMC, (Organización Mundial del Comercio). (2017). *Examen de las Políticas Comerciales: México*. OMC. https://www.wto.org/spanish/tratop_s/tpr_s/tp452_s.htm
- Oroinformación. (2019, julio 1). *China sigue comprando oro mientras se deshace de bonos del Tesoro estadounidense, por José Angel Pedraza*. Oroinformación. <https://oroinformacion.com/china-sigue-comprando-oro-mientras-se-deshace-de-bonos-del-tesoro-estadounidense/>
- Ortiz, A. (1994). *Política Económica de México 1982-1994. Dos sexenios neoliberales* (2 ed.). Nuestro Tiempo.
- Osman, C.-C., & Ghiran, A.-M. (2019). When Industry 4.0 meets Process Mining. *Procedia Computer Science*, 159, 2130–2136. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.386>
- Othón de Mendizábal, M. (1980). *La minería y la metalurgia mexicana (1520-1943)* (2 ed.). Centro de estudios históricos del movimiento obrero mexicano.
- Oyarzún Montalva, H. (2001). La tecnología en la administración moderna. En *XXIV Convención Internacional Acapulco, Guerrero, México*. Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México.
- Página 24. (2016, noviembre 13). *Cancelan Reserva en Zacatecas. Página 24*. <https://pagina24zacatecas.com.mx/2016/11/13/cancelan-reserva-en-zacatecas/>
- Parga Pérez, J. de J. (2018, septiembre 20). *Conferencia: Geología y planeación de proyectos mineros en la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas*.
- Parker, B., Rivett, T., Backeberg, P., McIntosh, A., El-Masry, S., & Heath, A. (2016). *Debottlenecking of thickeners in a changing environment*. 26.
- PDAC, (Prospectors & Developers Association of Canada), & Oreninc. (2019). *State of Mineral Finance 2019: At the Crossroads*. https://www.pdac.ca/docs/default-source/priorities/access-to-capital/state-of-mineral-finance-reports/pdac-state-of-mineral-finance-2019.pdf?sfvrsn=96808a98_6
- Peñoles. (2018). *Informe anual 2017* (p. 163). Peñoles. <http://www.penoles.com.mx/wPortal/content/conn/UCM/path/Carpetas/www/Sala%20de%20Prensa/Informes%20Anuales/Informe%20Anual%202017.pdf>

- Periódico Oficial del Estado de Zacatecas. (2018). *Ley de Ingresos del Estado de Zacatecas para el ejercicio fiscal 2019*.
<http://www.congreso Zacatecas.gob.mx/f/todojuridico&cual=228>
- Petersen, J. (2016). Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview. *Hydrometallurgy*, 165, 206–212.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.001>
- Phillips, J. (2016). Climate change and surface mining: A review of environment-human interactions & their spatial dynamics. *Applied Geography*, 74, 95–108.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.001>
- Pie de Página. (2019, junio 17). *Minera estadounidense exige a México 3,500 mdd por frenar proyecto, por Daniela Pastrana*. <https://piedepagina.mx/minera-estadunidense-exige-a-mexico-3500-mdd-por-frenar-proyecto/>
- Piñeiro, F. (2019, mayo 21). *El proceso de exploración*. Semana del estudiante Ciencias de la Tierra UAZ, Auditorio “Ing. J. Cruz Guerrero Gómez” UACT.
- Popp, D., Newell, R. G., & Jaffe, A. B. (2010). Chapter 21—Energy, the Environment, and Technological Change. En B. H. Hall & N. Rosenberg (Eds.), *Handbook of the Economics of Innovation* (Vol. 2, pp. 873–937). North-Holland.
[https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)02005-8](https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)02005-8)
- Presidencia de la República. (2012). *Sexto Informe de Gobierno del Presidente Felipe Calderon Hinojosa. Anexo estadístico*.
http://calderon.presidencia.gob.mx/informe/sextos/pdf/ANEXO_ESTADISTICO/Anexo_Estadistico_Sexto_Informe.pdf
- Presidencia de la República. (2018). *Sexto Informe de Gobierno del Presidente Enrique Peña Nieto. 4 México Próspero*. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/sexto-informe-de-gobierno>
- Proyecto Puente. (2019, agosto 2). Proponen iniciativa para crear impuesto ecológico contra empresas que contaminen. *Proyecto Puente*.
<https://proyectopuente.com.mx/2019/08/02/proponen-iniciativa-para-crear-impuesto-ecologico-contra-empresas-que-contaminen/>
- Ralston, J., Reid, D., Hargrave, C., & Hainsworth, D. (2014). Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(3), 305–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.03.003>
- Ramírez, A. de J., Maldonado, M. A., & Morales, G. (2016). *Guía de Usuario Registro Nacional de Emisiones (RENE)* (3 ed.). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/cicc/20160623_guia_rene.pdf

- Ramírez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*.
file:///C:/Users/ROBLES/Desktop/TESIS-1/articulos%207/articulos%20ya%20por%20nombres/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf
- Ramos Ramírez, A. (2014). El beneficio de patio en la hacienda “Las Mercedes” Zacatecas 1850. *Geomimet*, 310, 37–41.
- Reforma. (2015, junio 21). *Urgen a controlar sustancias químicas, por Evelyn Cervantes*. Reforma Nacional.
<https://www.reforma.com/aplicaciones/articulo/default.aspx?id=571617>
- Reyes, M. A. (2019, septiembre 27). *Presas de jales*. V Seminario sobre depósitos de jales, Auditorio de la Facultad de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846–852.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>
- Ritcey, G. M. (2005). Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*, 78(1), 3–20.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.01.001>
- Ritchie, I. M., Nicol, M. J., & Staunton, W. P. (2001). Are there realistic alternatives to cyanide as a lixiviant for gold at the present time? En *Cyanide: Social, industrial, and economic aspects* (pp. 427–440). Minerals, Metals & Materials Society.
- Rivera, M. A. (1992). *El nuevo capitalismo mexicano: El proceso de reestructuración, 1983-1989*. Ediciones Era.
- Robles, R., & Foladori, G. (2019). Una revisión histórica de la automatización de la minería en México. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 50(197), 157–180. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.197.64750>
- Robles, R., Foladori, G., & Záyago Lau, É. (2020). Industria 4.0 en la minería mexicana. *Revista de El Colegio de San Luis*, 10(21), 1–32.
<https://doi.org/10.21696/rcsl102120201167>
- Rodríguez, L., Ruiz, E., Alonso-Azcárate, J., & Rincón, J. (2009). Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 1106–1116.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.04.007>
- Rogozinski, J. (1997). *La privatización en México razones e impactos* (1 ed.). Trillas.
- Rohe, R. (1994). The Chinese and hydraulic mining in the far west. *The Chinese and Hydraulic Mining*, 73–91.
- Romero, F. M. (2019, septiembre 26). *Caracterización geoquímica y mineralógica: Importancia para el manejo y cierre ambientalmente seguro de los depósitos de jales*. V seminario sobre depósito de jales organizado por la CAMIMEX.

- Romero, F. M., & Gutiérrez, M. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43–53.
- Rosenberg, N. (1976). Marx as a Student of Technology. *Monthly Review*, 28(3), 56–77. https://doi.org/10.14452/MR-028-03-1976-07_5
- Rosenzweig, F. (1988). El desarrollo económico de México 1877 a 1911. *Secuencia*, 12, 151–190.
- Saade, M. (2014). *Buenas prácticas que favorezcan una minería sustentable: La problemática en torno a los pasivos ambientales mineros en Australia, el Canadá, Chile, Colombia, los Estados Unidos, México y el Perú*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37106-buenas-practicas-que-favorezcan-mineria-sustentable-la-problematika-torno>
- Salinas de Gortari, C. (2000). *México un paso difícil a la modernidad* (1 ed.). Plaza & Janés Editores.
- Salinas de Gortari, C. (2017). *Aliados y Adversarios TLCAN 1988-2017* (1 ed.). Debate.
- Sánchez-Albavera, F., & Lardé, J. (2006). *Minería y competitividad internacional en América Latina*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6304-mineria-competitividad-internacional-america-latina>
- Sandvik. (s/f). Automatización de la trituradora. *Sandvik*. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/trituradoras-y-alimentadores-estacionarios/automatizaci%C3%B3n-de-la-trituradora/>
- Sariego, J. L., Reygadas, L., Gómez, M. Á., & Farrera, J. (1988). *El Estado y la minería mexicana. Política, trabajo y sociedad durante el siglo XX* (1 ed.). Fondo de Cultura Económica.
- Schmidt, A. (1977). *El concepto de naturaleza en Marx* (2 ed.). Siglo Veintiuno Editores. <https://marxismocritico.files.wordpress.com/2011/11/schmidt-alfred-el-concepto-de-naturaleza-en-marx-1962.pdf>
- SCJN, (Suprema Corte de Justicia de la Nación). (2019). *Sesión Pública Ordinaria del Pleno de la Suprema Corte de Justicia de la Nación número 14*. SCJN. <https://www.scjn.gob.mx/sites/default/files/actas-sesiones-publicas/documento/2019-02-20/14-1.pdf>
- SE, (Secretaría de Economía). (2018). *Proyectos mineros operados por compañías de capital mexicano, 2018*. SE. Documento proporcionado por la SE
- SEMARNAT. (2013). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes fijas por sector y subsector SCIAN, 2008 (toneladas)*. Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_12_B&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce

- SEMARNAT. (2015). *Compendio de estadísticas ambientales edición 2015. Generación estimada de residuos peligrosos según tipo de industria*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/compendio_2015/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet7932.html
- SEMARNAT. (2017). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes fijas por sector y subsector SCIAN, 2013 (toneladas)*. Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_36&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*
- SEMARNAT. (2018). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes fijas por sector y subsector SCIAN, 2014 (toneladas)*. Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_37&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*
- SEMARNAT. (2019). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes fijas por sector y subsector SCIAN, 2016 (toneladas)*. Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_43&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (s/f). *Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes*. SEMARNAT. Recuperado el 12 de marzo de 2019, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:445/retc/retc/index.php?>
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2008). *Capítulo 7 Residuos peligrosos*. Informe de la situación del medio ambiente en México.
https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_2008/07_residuos/cap7_3.html
- SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2016). *Semarnat. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015*.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- SEMARNAT-INECC. (2016). *Mexico's Climate Change Mid-Century Strategy* (1 ed.). SEMARNAT-INECC.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166842/mexico_mcs_final_cop22nov16_red.pdf
- Semo, E. (1980). *Historia del Capitalismo en México. Los orígenes 1521/1763* (14 ed.). Ediciones Era.

- SENER. (2014). *Balance de energía 2013* (1 ed.). Secretaría de Energía.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41975/Balance_2013.pdf
- SENER. (2018). *Balance de energía 2017* (1 ed.). Secretaría de Energía.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2007). *Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2006*. Secretaría de Economía.
http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2006.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2011). *Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2010*. Secretaría de Economía.
http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/AnuarioEstadisticodelaMineriaMexicanaAmpliada2010.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2012). *Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2011*. Secretaría de Economía.
https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/informacion_sectorial/mineria/anuario_estadistico_mineria_ampliada_2011.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2013). *Anuario estadístico de la minería mexicana 2012*. Servicio Geológico Mexicano.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31737/anuario_mineria_mexicana_2012_ed2013.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2014). *Anuario estadístico de la minería mexicana 2013*. Servicio Geológico Mexicano.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31736/anuario_2013.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2015). *Anuario estadístico de la minería mexicana 2014*. Servicio Geológico Mexicano.
http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2014_Edicion_2015.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2016). *Panorama minero del estado de Zacatecas 2016*. Servicio Geológico Mexicano. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/ZACATECAS.pdf>
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2017). *Anuario estadístico de la minería mexicana 2016*. Servicio Geológico Mexicano.
https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2016_Edicion_2017.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2018). *Anuario estadístico de la minería mexicana, 2017*. Servicio Geológico Mexicano.
http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2017_Edicion_2018.pdf
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2019a). *Anuario estadístico de la minería mexicana, 2018*. Servicio Geológico Mexicano.
http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2018_Edicion_2019.pdf

- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2019b, febrero 15). *Minería de México: Proyectos mineros operados por compañías de capital extranjero*. Sistema Integral sobre Economía Minera (SINEM).
https://www.sgm.gob.mx/extranjeras/Consulta_Minera.jsp
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2019c, mayo 31). *Conoce el sistema de consulta de información geocientífica GeoInfoMex*. Gobierno de México.
<http://www.gob.mx/sgm/articulos/conoce-el-sistema-de-consulta-de-informacion-geocientifica-geoinfomex>
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (2019d). *Entrevista realizada al personal del Servicio Geológico Mexicano (SGM) en las instalaciones de Zacatecas el 23 de julio de 2019*.
- SGM, (Sistema Geológico Mexicano). (s/f). *Geoinfomex—SGM*. gob.mx.
<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Sharon, B. (2009, junio 3). How the Recession is Good for the Environment. *Newsweek*.
<http://www.newsweek.com/how-recession-good-environment-76311>
- Smith, A., & Struhsacker, D. W. (2007). *Chapter 13 Cyanide Geochemistry and Detoxification Regulations*.
- Sousa, R., Veiga, M., Zyl, D. [Van, Telmer, K., Spiegel, S., & Selder, J. (2011). Policies and regulations for Brazil's artisanal gold mining sector: Analysis and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 742–750.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.001>
- Stavins, R., & Grumbly, T. (1993). ¿Cómo hacer que pague el que contamina? *Facetas*, 102/4, 15–19.
- Stirling, A. (2007). Risk, precaution and science: Towards a more constructive policy debate. *EMBO Reports*, 8(4), 309–315. <https://doi.org/10.1038/sj.embor.7400953>
- Suopajarvi, L., & Kantola, A. (2020). The social impact management plan as a tool for local planning: Case study: Mining in Northern Finland. *Land Use Policy*, 93, 104046.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104046>
- Tello, C. (2008). *Estado y desarrollo económico: México 1920—2006* (2 ed.). UNAM Facultad de Economía.
- The Silver Institute. (2019). *World Silver Survey 2019*. The Silver Institute and Refinitiv.
<https://www.silverinstitute.org/wp-content/uploads/2019/04/WSS2019V2.pdf>
- Thornton, J. (2000). Beyond Risk: An Ecological Paradigm to Prevent Global Chemical Pollution. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 6(4), 318–330. <https://doi.org/10.1179/oeht.2000.6.4.318>
- Tickner, J. A., & Raffensperger, C. (1999). *The precautionary principle in action: A handbook* (1 ed.). Science and Environmental Health Network.
<https://training.fws.gov/resources/course-resources/pesticides/Limitations%20and%20Uncertainty/handbook.pdf>

- Tiess, G., & Ruban, D. A. (2013). Geological heritage and mining legislation: A brief conceptual assessment of the principal legal acts of selected EU countries. *Proceedings of the Geologists' Association*, 124(3), 411–416. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2012.11.001>
- Torres Chung, C. R. (2020, agosto 18). *Sistemas de Construcción y Crecimiento de Presas de Jales*. 2da. Jornada del Procesamiento de Minerales, Clúster Minero de Zacatecas. <https://clusmin.org/webinar-sistemas-de-construccion-y-crecimiento-de-presas-de-jales/>
- Tost, M., Murguía, D., Hitch, M., Lutter, S., Luckeneder, S., Feiel, S., & Moser, P. (2020). Ecosystem services costs of metal mining and pressures on biomes. *The Extractive Industries and Society*, 7(1), 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.11.013>
- Troxel. (s/f). *Sensores y sistemas para la minería. Cuando la seguridad es esencial*. Troxel. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de http://www.hegasaesp.com/administrador/repositorio/file/troxel/troxel_mining.pdf
- UN, (United Nations). (s/f). *Cronología de negociaciones sobre el clima*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado el 6 de junio de 2020, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cronologia-de-negociaciones-sobre-el-clima/>
- UN, (United Nations). (1966). *The process of industrial development in Latin America*. United Nations Publication.
- UN, (United Nations). (1992). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. División de Desarrollo Sostenible. <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm>
- UN, (United Nations). (2002). *Report of the World Summit on Sustainable Development, Johannesburg, South Africa, 26 August-4 September 2002*. 184. <http://digitalibrary.un.org/record/478154>
- UNEP, (United Nations Environmental Programme). (s/f). *Aire | UN Environment Assembly*. UN Environment. Recuperado el 19 de julio de 2019, de <https://web.unep.org/environmentassembly/es/aire>
- UNIDO, (United Nations Industrial Development Organization). (2007). *Strategic Approach to International Chemicals Management*. https://www.unido.org/sites/default/files/2007-11/67181_IDB.33.20E_0.pdf
- United States Census Bureau. (2018). *North American Industry Classification System (NAICS) Main Page*. <https://www.census.gov/eos/www/naics/>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>

- Vega Roldán, O. (2019, septiembre 26). *Aspectos de proyecto*. V seminario sobre depósito de jales organizado por la CAMIMEX.
- Vélez-Torres, I. (2014). Governmental extractivism in Colombia: Legislation, securitization and the local settings of mining control. *Political Geography*, 38, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2013.11.008>
- Vella, H. (2017, diciembre 19). The fourth industrial revolution: Bringing AI to mining. *Mining Technology*. <https://www.mining-technology.com/features/fourth-industrial-revolution-bringing-ai-mining/>
- Vogel-Heuser, B., & Hess, D. (2016). Guest Editorial Industry 4.0—Prerequisites and Visions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), 411–413. <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2523639>
- Wallerstein, I. (2011). *El moderno sistema mundial* (2 ed., Vol. 1). Siglo XXI editores.
- Watzel, R., Rühlemann, C., & Vink, A. (2020). Mining mineral resources from the seabed: Opportunities and challenges. *Marine Policy*, 114, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103828>
- Wiener, J., & Rogers, M. (2002). Comparing Precaution in the United States and Europe. *Journal of Risk Research*, 5, 317–349. <https://doi.org/10.1080/13669870210153684>
- Wikipedia. (2018). National Instrument 43-101. En *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=National_Instrument_43-101&oldid=849397609
- Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills Mineral Processing Technology* (7 ed.). Elsevier Science & Technology Books.
- World Economic Forum. (2017a). *Digital Transformation Initiative. Mining and Metals Industry*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/whitepapers/digital-transformation-initiative/>
- World Economic Forum. (2017b). *The Global Risks Report 2017* (12 ed.). http://www3.weforum.org/docs/GRR17_Report_web.pdf
- Xi, X., Zhou, J., Gao, X., Wang, Z., & Si, J. (2020). Impact of the global mineral trade structure on national economies based on complex network and panel quantile regression analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104637. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104637>
- Yannopoulos, J. C. (1991). Treatment of Refractory Gold Ores. En *The Extractive Metallurgy of Gold* (pp. 79–114). Springer.
- Young, C. (2001). Cyanide: Just the facts. En *Cyanide: Social, industrial, and economic aspects* (pp. 97–113). Minerals, Metals & Materials Society.
- Young, C. A., & Jordan, T. S. (1995). *Cyanide Remediation: Current and past technologies*.

Zagury, G. J., Oudjehani, K., & Deschênes, L. (2004). Characterization and availability of cyanide in solid mine tailings from gold extraction plants. *Science of The Total Environment*, 320(2), 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.08.012>