



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS**

**Potencial de los sistemas fotovoltaicos flotantes  
en los depósitos de jales de las unidades mineras  
en el estado de Zacatecas**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Licenciado en Geografía**

**PRESENTA**

Jan Bärwald

**ASESORA**

Dra. María Teresa Sánchez Salazar



Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que me acompañaron y apoyaron en la elaboración de este trabajo.

A mi familia en Alemania: mis padres Marion y Dirk, mis abuelos Dieter y Roswitha, mi hermano Marc, mi tía Birgit, mi prima Julia, mis sobrinos Pepe, Ben y Theo, por haberme posibilitado la experiencia de estudiar en la UNAM de la Ciudad de México.

A mis amigas y amigos: Tanja, Daniela, Lene, Sandra, Majon, Steffi, Caro, Stephi y la familia Bozic, porque fueron el apoyo mental que me ayudaba en tiempos difíciles y siempre me daban la sensación de ser extrañado.

A la familia Flores: Mónica y Carmen, por haberme acogido en sus casas; Daniel, por ser la persona más especial para mí.

A mis compañeras y compañeros: Andrea Gutiérrez Mendoza, por ser una mujer moderna e intelectual y haberme expresado su reconocimiento sobre la dificultad de estudiar en una universidad extranjera; Jazmín Plaza Soriana y Mitzi Rosales Rodríguez, por la compañía afectuosa y placentera; Lanceloth Gómez Nigo, por su ayuda en dudas escolares; Guadalupe Tapia Varela, por sus consejos y ser el alma buena del cubículo 14.

A mi asesora y los sinodales: Dra. María Teresa Sánchez Salazar, por ser una gran persona afectuosa, inteligente y sabia, sacrificando mucho esfuerzo y tiempo en la formación de futuros geógrafas y geógrafos; Dr. Jesús Abraham Navarro Moreno, por sus opiniones valiosas y sus aportaciones en los asuntos de la cartografía; Dra. Leticia Gómez Mendoza, por su conocimiento y haber revitalizado mi interés en la climatología; Mtra. Oralia Oropeza Orozco, por orientarme y contribuir a este proyecto; Dra. Iracema Gavilán Galicia, por su perspectiva con respecto al tema de la investigación presente.

Al Instituto de Geografía de la UNAM, por haberme dado la oportunidad de ganar experiencia en la investigación geográfica en el marco del proyecto PAPIIT titulado “Atlas de la Minería de México” con la clave IN303417; la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, por el apoyo económico para seguir con los estudios y la realización del trabajo de campo; las autoridades de las unidades mineras Del Toro en Chalchihuites, Fresnillo/Saucito y Vetagrande, por su disposición en las visitas guiadas y las entrevistas.

A mis profesores del Colegio de Geografía: Alberto Pérez Rojas, Flor Mireya López Guerrero, Jorge Gonzalo Sánchez Cabrera, Eduardo Antonio Pérez Torres, Claudia Vallejo Albarrán, Federico José Saracho López, Armando García de León Loza, Lorena Villanueva Carmona, María del Carmen Juárez Gutiérrez y Angélica Lucía Damián Bernal, por su forma de ser y pasión de enseñanza, su conocimiento y sabiduría, así como su reconocimiento de mi esfuerzo e interés en sus clases.

*“Wir wollen eine Gesellschaft,  
die mehr Freiheit bietet und  
mehr Mitverantwortung fordert.”*

*Queremos una sociedad  
que más libertad ofrece  
y más responsabilidad exige.*

Willy Brandt  
Partido Socialdemócrata  
28 de octubre de 1969

# Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Marco teórico-conceptual y metodológico	6
1.1. La perspectiva geográfica: componentes e interrelaciones	6
1.2. Energía solar fotovoltaica	10
1.3. Minería	21
1.4. Cambio climático	29
1.5. Sustentabilidad	32
1.6. Antecedentes de investigación	35
1.7. Metodología	40
Capítulo 2. Importancia de los conceptos clave para el caso de México	42
2.1. Producción energética	42
2.2. Actividad minera	49
Capítulo 3. Contexto físico-geográfico, social y económico del estado de Zacatecas	52
3.1. Naturaleza	54
3.2. Sociedad	72
3.3. Economía	83
Capítulo 4. Propuesta de los sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas	101
4.1. Distribución geográfica de las unidades mineras activas	101
4.2. Resultados del trabajo en campo	104
4.3. Análisis FODA	115
4.4. Potencial de la propuesta	125
Conclusiones	133
Referencias	138

## Índice de cuadros

Cuadro 1.1.	Componentes más relevantes del espacio geográfico para abordar el tema de investigación.	9
Cuadro 1.2.	Clasificación de las plantas fotovoltaicas de acuerdo con su capacidad instalada	14
Cuadro 1.3.	Clasificación, eficiencia energética y pérdida de ésta en los paneles solares.	19
Cuadro 1.4.	Clasificación económica de los minerales.	21
Cuadro 1.5.	Fases de desarrollo de la minería.	24
Cuadro 1.6.	Principales factores considerados para evaluar la aptitud de un sitio para instalar un depósito de jales.	28
Cuadro 2.1.	Generación eléctrica de origen fotovoltaico en los diez países que concentran la mayor capacidad instalada y capacidad acumulada (gigavatio, GW), 2018.	45
Cuadro 2.2.	Producción de energía por tipo de energético en México y el mundo.	46
Cuadro 2.3.	Participación de las energías renovables en el consumo energético total en algunos países seleccionados, 2018.	47
Cuadro 2.4.	Crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector industrial y la minería de México durante el periodo 1990-2015.	50
Cuadro 3.1.	Evolución de la superficie ocupada por tipo de uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 1997-2016.	57
Cuadro 3.2.	Principales municipios con producción minera metálica del estado de Zacatecas, 1988-2016.	89
Cuadro 4.1.	Interpretación del Índice Rn.	102
Cuadro 4.2.	Resumen de la planeación de las visitas guiadas en las unidades mineras.	105
Cuadro 4.3.	Resumen de los factores del análisis FODA que favorecen y desfavorecen la construcción y la operación de los sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales para las empresas mineras.	124
Cuadro 4.4.	Resultados de las simulaciones sobre el rendimiento de plantas fotovoltaicas flotantes en los depósitos de jales.	130

## Índice de figuras

Figura 1.1.	Ejemplo de la gran minería: Panorámica de la unidad minera Fresnillo, Zacatecas.	23
Figura 1.2.	Ejemplo de la minería mediana: Panorámica de la unidad minera Del Toro en Chalchihuites, Zacatecas.	23
Figura 1.3.	Acceso a la mina subterránea mediante el tiro de color amarillo en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.	25
Figuras 1.4, 1.5.	Proceso de flotación en la planta de beneficio de la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.	26
Figura 1.6.	Depósito de jales en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.	27
Figura 2.1.	Radiación global horizontal en México.	48
Figura 2.2.	Potencial de la energía solar fotovoltaica en México.	48
Figura 3.1.	División política municipal del estado de Zacatecas, 2010.	53
Figura 3.2.	Altimetría en el estado de Zacatecas, 2013.	59
Figura 3.3.	Tipos de clima en el estado de Zacatecas según la clasificación de Enriqueta García, 1998.	60
Figura 3.4.	Temperatura media anual en el estado de Zacatecas, 1998.	61
Figura 3.5.	Precipitación anual en el estado de Zacatecas, 1998.	62
Figura 3.6.	Insolación anual en el estado de Zacatecas, 1990.	63
Figura 3.7.	Peligro por presencia de sequías en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.	64
Figura 3.8.	Peligro por presencia de ciclones tropicales en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.	65
Figura 3.9.	Peligro por presencia de tormentas de granizo en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.	66
Figura 3.10.	Peligro por presencia de nevadas en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.	67
Figura 3.11.	Uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 1997.	68
Figura 3.12.	Uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 2005.	69
Figura 3.13.	Uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 2016.	70
Figura 3.14.	Áreas Naturales Protegidas en el estado de Zacatecas, 2017.	71
Figura 3.15.	Distribución de la población en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.	76
Figura 3.16.	Evolución de la población en el estado de Zacatecas por municipio, 2000-2010.	77
Figura 3.17.	Estructura por edad y género de la población en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.	78
Figura 3.18.	Población inmigrante en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.	79
Figura 3.19.	Población con discapacidad en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.	80
Figura 3.20.	Marginación y acceso a servicios de salud pública en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.	81
Figura 3.21.	Urbanización y condiciones de las viviendas en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.	82
Figura 3.22.	PIB del estado de Zacatecas por sector económico, 2016.	83

Figura 3.23.	Evolución del PIB del estado de Zacatecas por sector económico, 2011-2016.	83
Figura 3.24.	Evolución del PIB industrial del estado de Zacatecas por rama económica, 2011-2016.	84
Figura 3.25.	Tasa de crecimiento medio anual del PIB del estado de Zacatecas por rama económica, 2011-2016.	85
Figura 3.26.	Producción bruta total en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.	90
Figura 3.27.	Principal actividad según la producción bruta total en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.	91
Figura 3.28.	Producción bruta total de la actividad minera en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.	92
Figura 3.29.	Población ocupada y desocupada en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.	93
Figura 3.30.	Principal actividad según la población ocupada en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.	94
Figura 3.31.	Población ocupada en la actividad minera en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.	95
Figura 3.32.	Oro: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.	96
Figura 3.33.	Plata: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.	97
Figura 3.34.	Plomo: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.	98
Figura 3.35.	Zinc: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.	99
Figura 3.36.	Cobre: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.	100
Figura 4.1.	Unidades mineras activas con producción de minerales metálicos en el estado de Zacatecas, 2019.	103
Figura 4.2.	Parque ecológico ‘Los Jales’ en Fresnillo, Zacatecas.	106
Figura 4.3.	Instalación de paneles solares en el techo del estadio de fútbol en Fresnillo, Zacatecas.	107
Figura 4.4.	Banca fabricada con material reciclado en la UMA en Fresnillo, Zacatecas.	107
Figura 4.5.	Depósito de jales seco en la unidad minera Del Toro en Chalchihuites, Zacatecas.	109
Figura 4.6.	Trituración del material extraído y su transporte mediante bandas en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.	111
Figura 4.7.	Área de molinos en la planta de beneficio de la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.	112
Figura 4.8.	Aparato para recircular el agua desde el depósito de jales hacia los procesos mineros mediante una bomba y una tubería en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.	112
Figura 4.9.	Tiro de la mina San Bernabé con la ciudad de Zacatecas en el fondo.	114
Figura 4.10.	Rampa de acceso a los yacimientos minerales en la mina San Bernabé, Zacatecas.	114
Figura 4.11.	Iglesia y la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.	122
Figura 4.12.	Ubicación del depósito de jales en la unidad minera Cozamin, Zacatecas.	126
Figura 4.13.	Planta fotovoltaica flotante en la unidad minera Los Broncos en Chile.	127
Figura 4.14.	Generación de energía solar fotovoltaica en las unidades mineras del estado de Zacatecas, 2019.	131



# Introducción

La generación de energía es un proceso en el cual se transforma un recurso natural de carácter no renovable, renovable, o inagotable para la realización de un trabajo. La radiación solar, que pertenece al grupo de los recursos inagotables, es la base de la energía solar fotovoltaica; ésta es una de las energías renovables para satisfacer la demanda energética en la actualidad.

Para el aprovechamiento del recurso solar se emplea la tecnología de las plantas fotovoltaicas, que comúnmente se instalan sobre la parte sólida de la Tierra. Su aplicación es posible también en los cuerpos de agua, en los cuales se mantienen por medio de una estructura flotante. De este modo, en los depósitos de jales, que son cuerpos artificiales de agua con residuos disueltos derivados del beneficio de los minerales en las unidades mineras, se puede emplazar un sistema fotovoltaico flotante.

De hecho, la identificación de los sitios apropiados para su instalación es un proceso complejo que está asociado con el cumplimiento de diversos criterios y restricciones. Los diferentes tipos tecnológicos y los distintos lugares presentan ventajas y desventajas, por lo que existe un empeño de fomentarlas o atenuarlas, respectivamente.

La localización de México en las latitudes bajas, donde los rayos solares inciden de forma más perpendicular, le convierte en un lugar apto para la generación de energía solar fotovoltaica, porque la radiación solar es más elevada que en las latitudes medias y altas. Sin embargo, la inserción de las energías renovables en general, y de la energía solar fotovoltaica en particular, no tiene una difusión amplia en el país. Tradicionalmente, la abundancia de los yacimientos de hidrocarburos (petróleo y gas natural) establecieron el predominio del uso de los energéticos fósiles. La existencia de estos recursos no renovables se limita en una minoría de entidades federativas de México.

Debido a la formación de estos yacimientos a una escala temporal geológica, el agotamiento de este tipo de recursos significa un problema; sobre todo el petróleo y sus derivados se procesan para una gran cantidad de productos y el suministro de energía. Estos procesos contribuyeron y siguen contribuyendo al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera en las últimas décadas, que resultó en un reforzamiento del calentamiento global por las propiedades que tienen estos

contaminantes. En el presente y en el futuro, los impactos negativos de ese fenómeno repercuten y van a repercutir en el ambiente, en la calidad de vida y en la seguridad de las comunidades afectadas, así como en las actividades económicas.

La presencia de este cambio climático acelerado es la consecuencia de las acciones humanas no sustentables; aparte de la quema de combustibles fósiles, la deforestación de grandes áreas boscosas elimina los servicios ambientales de éstas. La sustitución de los energéticos fósiles por la energía solar fotovoltaica con el propósito de generar electricidad es una medida sustentable, que se contrapone al aumento de la concentración de sustancias tóxicas que contaminan el agua, el aire, el suelo y el subsuelo.

En México, el estado de Zacatecas destaca por su importancia de la actividad minera y, posteriormente, asegura la existencia de depósitos de jales disponibles para posibilitar la instalación de las plantas fotovoltaicas flotantes. Igualmente, esta entidad federativa recibe una cantidad de radiación solar considerable; el clima árido y semiárido demuestra la carencia de nubes que podrían disminuir la intensidad de los rayos solares.

Aunque las plantas fotovoltaicas flotantes son una innovación tecnológica reciente, existen estudios de casos que comprueban que son instalaciones factibles y viables. Los resultados de esta investigación podrían ser útiles para las empresas mineras en el estado de Zacatecas, pero también para el resto del país, siempre y cuando se presenten las condiciones climáticas y las características de las unidades mineras semejantes al caso de este proyecto. Igualmente, los resultados podrían ser interesante para las instituciones que gestionan la producción de la energía eléctrica, así como su distribución y su consumo: la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Esta investigación plantea una serie de preguntas que se desean responder y sirven para guiar el estudio y cumplir con sus propósitos:

- ¿Qué tipos de energía solar fotovoltaica existen y cuáles son sus ventajas y desventajas?
- ¿Qué características físico-geográficas intervienen en el rendimiento de las plantas de energía solar fotovoltaica?
- ¿Cuáles son los requisitos para instalar una planta fotovoltaica con el propósito de generar de electricidad?

- ¿Cuál es la importancia de la minería en el estado de Zacatecas de acuerdo con el volumen de producción de minerales metálicos y cómo se distribuye la producción por municipio?
- ¿Cuáles son las unidades mineras con mayor producción en las minas y mayor capacidad en las plantas de beneficio en el estado de Zacatecas?
- ¿Cuál es la relación entre el volumen de producción minera y el tamaño de los depósitos de jales en las unidades mineras?
- ¿Cómo se manejan los residuos en las unidades mineras?
- ¿Cuál es la interacción entre la minería y la emisión de gases del efecto invernadero?
- ¿Con qué ventajas y posibilidades cuenta una empresa minera para instalar un sistema fotovoltaico flotante?
- ¿Qué barreras dificultan o impiden la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes?
- ¿Cuál es el potencial hipotético con el que aportarían los sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales para generar electricidad en las unidades mineras?

Con base en las preguntas planteadas, el objetivo general de este proyecto es determinar el potencial que existe para la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas bajo las condiciones climáticas actuales. Por un lado, el potencial hace referencia a un valor numérico que proporciona una cantidad hipotética de energía eléctrica producida por una planta fotovoltaica flotante en los depósitos de jales. Por otro lado, el propósito de identificar el potencial radica en señalar la aptitud que poseen los depósitos de jales de las unidades mineras como sitio adecuado para el emplazamiento de los sistemas fotovoltaicos flotantes. La generación de energía eléctrica mediante la tecnología de módulos fotovoltaicos en las unidades mineras se concibe como una medida para aportar a la demanda energética en éstas, así como una estrategia para reducir el impacto ambiental que provoca la actividad minera. Para cumplir con el objetivo general, se consideraron los siguientes objetivos particulares:

- Identificar las ventajas y desventajas de los diferentes tipos del aprovechamiento de la energía fotovoltaica.
- Conocer la magnitud de la radiación solar incidente en el estado de Zacatecas.

- Compilar los requisitos fundamentales para la instalación de una planta fotovoltaica con el propósito de generar electricidad.
- Precisar la importancia de la minería en el estado de Zacatecas de acuerdo con el volumen de producción de minerales metálicos a nivel estatal y municipal.
- Ilustrar las unidades mineras activas con mayor producción en las minas y mayor capacidad en las plantas de beneficio en el estado de Zacatecas.
- Describir el manejo de los residuos mineros por medio del depósito de jales.
- Elaborar una presunción sobre la relación entre la cantidad de producción y el tamaño de los depósitos de jales de las unidades mineras.
- Estimar la interacción entre la minería y la emisión de gases del efecto invernadero.
- Identificar las ventajas y las posibilidades que tienen las empresas mineras para instalar un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas.
- Construir un aparato crítico para señalar las barreras que pueden dificultar o impedir la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas.
- Aplicar de forma hipotética los diferentes métodos para calcular el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas para la generación de electricidad.

Este proyecto se apoyó en los métodos cuantitativos y cualitativos, que se describirán de forma detallada más adelante. Lo fundamental radicó en localizar las unidades mineras en el estado zacatecano, estimar el área disponible en los depósitos de jales y, posteriormente, emplear tres herramientas en línea para calcular el rendimiento de una planta fotovoltaica flotante para generar energía eléctrica bajo las condiciones de la radiación solar del sitio y el tamaño hipotético de dicha planta. El trabajo de campo, que consistió en visitas guiadas de las unidades mineras seleccionadas, se realizó con el propósito de averiguar más sobre la factibilidad de la propuesta del aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en los depósitos de jales.

La colaboración regular por parte de las autoridades de las empresas mineras limitó la revisión del estado de los depósitos de jales. A causa de la carencia de datos sobre la extensión y la cantidad del agua que contienen, la estimación del potencial de las plantas fotovoltaicas flotantes fue una aproximación. No fue posible descubrir la postura de las

empresas ante la inserción de las energías renovables -la solar fotovoltaica en particular- en las unidades mineras. Tampoco se conoció la cantidad de energía eléctrica que se requiere para el conjunto de los procesos mineros; esto hubiera sido útil para relativizar los resultados de las simulaciones sobre el potencial hipotético con el total de energía que se consume en cada unidad.

Además de la parte introductoria, en la cual se planteó el problema y se exhibieron los propósitos, esta investigación se estructuró en cuatro grandes secciones.

El primer capítulo conformará las bases teóricas del estudio de caso presente. En éste se mencionará la validez y la necesidad de indagar sobre este tema desde una perspectiva geográfica. Asimismo, se explicarán los conceptos clave de manera completa y detallada que posibilitará la comprensión de éstos. El estado de arte dará una vista de conjunto sobre las investigaciones previas asociadas a este proyecto, y se describirán los métodos que se emplearon para cumplir los objetivos planeados.

En el segundo capítulo se hará referencia a los conceptos centrales de este proyecto y sus vínculos con México para dar un contexto general. Se mostrará la participación de los diferentes tipos energéticos en la producción de energía, con un enfoque en la energía solar fotovoltaica. La situación de la minería y su participación en la emisión de gases de efecto invernadero se examinará para entender la problemática y la necesidad de implementar medidas para cuidar el ambiente.

Esto será el punto de partida para formar una conexión con el siguiente capítulo, en el cual se desarrollará el estado de Zacatecas como área de estudio. Esta tercera sección indicará un panorama en los ámbitos físico-geográfico, social y económico de esa entidad federativa para describir e interpretar sus características presentes.

A continuación, el cuarto capítulo señalará la distribución de las unidades mineras y revelará los resultados de las visitas guiadas en algunas de éstas. Igualmente, se resumirán mediante el análisis FODA las oportunidades y las barreras de la instalación de un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales; la parte sobre el potencial que tendría la propuesta para generar energía eléctrica cerrará esta sección.

En la parte final se recapitulará el conocimiento adquirido más significativo y se extraerán las conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

# Capítulo 1

## Marco teórico-conceptual y metodológico

En este capítulo, en primera instancia, se describirán los elementos relevantes desde la perspectiva de la geografía para abordar el proyecto. El posicionamiento desde la ciencia geográfica demostrará la importancia de ella para la toma de decisiones en asuntos actuales y significantes. Además, es necesario explicitar algunos conceptos que se mencionarán a lo largo del trabajo, con el fin de tener nociones conceptuales que apoyen la lectura e interpretación del texto. También, es fundamental hacer referencia a estudios antecedentes sobre el tema de investigación desde diferentes perspectivas disciplinares.

### 1.1. La perspectiva geográfica: componentes e interrelaciones

Primeramente, resulta relevante identificar el objeto de la geografía y cómo se define esta disciplina. La Real Academia Española (RAE 2019a) señala que la geografía es la “ciencia que trata de la descripción de la Tierra”, que resulta de la traducción del término latín. No obstante, esta definición es muy sencilla e insuficiente para averiguar su esencia y validez en el caso de este proyecto.

El geógrafo mexicano Ortiz Pérez (2019, 14) indica que “la geografía, como ciencia de la organización del espacio terrestre, analiza y evalúa las relaciones que caracterizan hechos y fenómenos que ocurren en una porción de la superficie terrestre en un tiempo determinado”. Por lo tanto, la geografía es más bien una disciplina dinámica e integral cuyos alcances van más allá de simplemente describir sus componentes. Asimismo, se incluyen dos términos que en algunas ocasiones se usan como sinónimos, aunque en la realidad presentan algunas diferencias: el espacio y la superficie terrestre. El espacio es una noción abstracta y poco clara, puesto que se puede utilizar en cualquier disciplina y significar cualquier extensión o forma, mientras que la superficie terrestre se concibe de forma concreta sin dejar confusión sobre su comprensión. Sin embargo, la expresión de ‘superficie terrestre’ tampoco es precisa. Sin duda, Ortiz Pérez hace referencia a que la superficie de la Tierra incluye las partes continental y oceánica, pero también puede comprender exclusivamente la corteza terrestre o ésta y el componente sólido que forma el fondo de los cuerpos de agua. Por eso, la superficie terrestre es un concepto ambiguo y

vago de igual manera que el espacio terrestre, ya que lo terrestre puede hacer referencia tanto a la tierra como a la Tierra. Más allá, con el término ‘superficie’ se asocia lo somero y no tanto los procesos que ocurren, por ejemplo, en la atmósfera o en el interior de la Tierra, y que condicionan las características de un lugar determinado. En cambio, la vida humana se desarrolla en la superficie que se constituyó y se sigue modificando por hechos y fenómenos de la climatología, la geomorfología, etcétera. Esos procesos influyen en la configuración de un espacio, pero para las sociedades importan finalmente los efectos sobre dicho espacio que le imprimen determinadas características y menos los procesos mismos.

Aunque se ha mencionado previamente que el espacio es un concepto abstracto, el espacio geográfico se puede entender como un sitio o un área donde se interrelacionan la naturaleza y la sociedad. Pero la dificultad en definir esa expresión proviene de varios enfoques que han surgido en la geografía durante los últimos tres siglos, en los cuales después de su institucionalización en las universidades, las corrientes geográficas se concentraron principalmente en el estudio del medio físico y el paisaje antes de cambiar para hacer énfasis en las actividades humanas y tomar una posición crítica hacia las acciones de las sociedades que causaban desigualdades y pobreza. El resultado es la existencia de un desacuerdo en el ámbito de la disciplina por la definición de la geografía como la relación entre la naturaleza y la sociedad, pues esta explicación es considerada insuficiente y no logra satisfacer las diferentes perspectivas desde las cuales se puede analizar el espacio geográfico.

De acuerdo con Ortiz Pérez (2019, 17), la ciencia geográfica aborda el estudio del espacio desde un enfoque complejo, por el que se requiere la capacidad de sintetizar “la interrelación ambiental” con las actividades humanas en un espacio determinado. Por consiguiente, se comprende a la geografía como la ciencia que estudia el vínculo entre acontecimientos, procesos y sistemas bioquímicos, físico-naturales, demográficos, económicos, políticos y socioculturales que suceden en un lugar, área o territorio específico. Asimismo, se puede plantear el uso del término ‘mundo’ en vez de ‘Tierra’, porque la Tierra se asocia con lo físico-geográfico, mientras que el mundo hace referencia a una construcción social. Y, aunque el ser humano no habita todo el planeta, debido a los intereses de explotar recursos en la Antártida, la confrontación con las consecuencias del cambio climático en las masas glaciares de las zonas polares, o bien, la aspiración de aprovechar económicamente el ambiente en general, cualquier sitio de la Tierra se comprende bajo un concepto socioeconómico.

A continuación, se identifican los elementos relevantes del espacio geográfico para el desarrollo de este tema de investigación. A partir de una categorización clásica de la geografía en sus dos ramas principales -física y humana- se determinan los componentes que las conforman y caracterizan. Por un lado, el medio físico comprende los componentes geológico-tectónico, geomorfológico, climático, hidrológico, edáfico y biogeográfico (flora y fauna).

La hidrología y la edafología tienen un papel menos importante para la instalación de una planta fotovoltaica flotante en los depósitos de jales, porque éstos son cuerpos artificiales de agua con residuos disueltos derivados del beneficio de los minerales y requieren de una capa o revestimiento impermeable que impida la infiltración del agua contaminada hacia el suelo. Por eso, los cuerpos de agua naturales y los suelos no intervienen de manera directa por la falta del contacto físico con la tecnología; por consiguiente, no se detallará su impacto en este proyecto.

La geomorfología tiene un papel significativo, ya que el relieve importa con respecto a la posibilidad de ocasionar sombra y, por ende, interviene en el rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Por un lado, las elevaciones en torno de una planta fotovoltaica impiden la incidencia de la luz solar; por otro lado, un terreno plano puede ocasionar el sombreado causado por la fila de paneles solares delantera a las filas detrás de ésta. A causa de la flexibilidad en la inclinación de los paneles solares, se tiene la posibilidad de compensar la pendiente del terreno por medio del ajuste de la posición de los módulos para aumentar su producción de energía eléctrica. La limitación orográfica en la construcción de las plantas fotovoltaicas radica en el mayor costo del fundamento, porque una mayor pendiente exige una estructura más sofisticada.

Los procesos geológicos son de mucha importancia, puesto que originan los yacimientos de minerales metálicos y/o no metálicos, por lo que la localización de las unidades mineras depende de éstos. Por ejemplo, el centro-norte, norte, noroeste y occidente de México cuenta con una riqueza de metales preciosos, el este y sureste principalmente es rico en minerales no metálicos.

Asimismo, el componente climático es significativo, porque la intensidad de la radiación solar influye en la cantidad de electricidad generada mediante los paneles fotovoltaicos. Estos módulos varían en su rendimiento con los cambios de la temperatura del ambiente.

Por último, el componente de flora y fauna interviene de dos maneras en esta investigación causando impactos considerables e indeseables; por una parte, la instalación



de plantas fotovoltaicas requiere la remoción o la poda de vegetación que provoca la pérdida de ecosistemas o hábitats de la fauna; por otra parte, los animales, sobre todo las aves, pueden buscar refugio en los módulos fotovoltaicos y dañar éstos, así como los residuos generados durante la operación de las unidades mineras pueden afectar a la flora y fauna.

Por otro lado, la geografía humana se encarga del estudio del comportamiento de la sociedad y la economía en el espacio. Con respecto a la sociedad, factores interesantes para considerar en este proyecto son los demográficos como la población relativa y su densidad, la estructura de la población (la edad y el género), la población hablante de lengua indígena y la dinámica temporal, en la cual se analiza el crecimiento natural y social. Igualmente, las características socioculturales, por ejemplo, la educación, la salud y la vivienda, son variables que aportan a la interpretación de las condiciones bajo las que vive la población. Finalmente, los indicadores económicos del producto interno bruto (PIB) estatal, la producción bruta total por municipio y la población ocupada por sector económico y rama se necesitan para identificar la importancia y presencia de la minería en el país y en el estado de Zacatecas.

Por lo tanto, se pueden destacar varios componentes del espacio geográfico que se asocian con el tema de investigación (cuadro 1.1). Esto demuestra la validez de estudiar el potencial para la construcción de plantas fotovoltaicas en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas desde una perspectiva geográfica. Por consiguiente, los conceptos centrales en esta investigación son la energía solar fotovoltaica como innovación tecnológica para generar la electricidad y la minería, que es la actividad económica para el emplazamiento de dicha tecnología. También, la climatología como base para comprender el comportamiento de la radiación solar y el cambio climático, y junto con el concepto del desarrollo sustentable son temas fundamentales de los que suscitó la investigación presente.

Cuadro 1.1. Componentes más relevantes del espacio geográfico para abordar el tema de investigación.

Característica	Físico-geográfica	Demográfica	Social	Económica
Componente o variable	Geológico	Población relativa y densidad	Marginación	Producción bruta total
	Geomorfológico	Crecimiento poblacional	Educación	Población ocupada por género y desempleo
	Climático	Estructura por edad y género	Salud	Población ocupada por sector y rama
	Biogeográfico	Urbanización	Vivienda	Actividad minera por municipio

Fuente: Elaboración propia.

Además, la importancia de la perspectiva geográfica de este proyecto radica en la interrelación de los elementos identificados, porque interviene en la toma de decisiones con respecto a la localización de un sistema fotovoltaico flotante. En efecto, la localización desempeña un papel importante en el consumo de energía, porque la SENER (2018, 32) señaló que el 2.1 % de la energía producida se pierde debido a su transmisión, transporte y distribución. Al respecto, Mundo Hernández *et al.* (2014, 647) indicaron que alrededor de 30 % de la electricidad producida por plantas fotovoltaicas pequeñas se pierde durante su transmisión. También, Pearce (2002, 665) aludió a la menor cantidad disponible de electricidad, por consiguiente, la generación de electricidad *in situ* evita una pérdida de energía y elevadas inversiones en infraestructura, debido a la cercanía espacial de la producción y el consumo de la energía.

## **1.2. Energía solar fotovoltaica**

Antes de explicar la energía solar fotovoltaica, es necesario aludir al recurso natural que posibilita este tipo de producción de energía: la radiación solar. Ésta es la energía que se origina a partir de las reacciones termonucleares en el núcleo solar y que se transporta mediante ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias o longitudes de onda desde el Sol hasta la superficie de la Tierra. De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2012, 341), su valor, la constante solar, es de 1367 watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ), aunque, efectivamente, la superficie terrestre recibe en promedio 1000  $W/m^2$ . Esto se debe a la composición de la atmósfera, puesto que los componentes interfieren en el transporte de dicha energía y disminuyen la intensidad de los rayos solares. Durante los días despejados y secos se recibe el 65 % de la radiación total, mientras que la inestabilidad atmosférica con formación de nubes y precipitación reduce notablemente la radiación solar hasta un 10 %. La insolación es la cantidad de la energía solar que llega a la superficie de la Tierra; se suele medir con la unidad de kilovatio-hora por metro cuadrado ( $kWh/m^2$ ), que es el resultado del número de horas de insolación que recibe cualquier sitio en el planeta. El Sol emite tres diferentes tipos de radiación: la radiación ultravioleta (10 %), la luz visible (40 %) y la radiación infrarroja (50 %). Los rayos solares que llegan a la superficie de la Tierra son de importancia para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. La radiación directa normal es la que se traduce en una mayor insolación, en tanto que la radiación difusa

horizontal es la que se encuentra dispersa en la atmósfera. La radiación global horizontal une los dos tipos señalados y su cantidad total es la que se considera para este proyecto.

La difusión del uso de la energía solar fotovoltaica significa una diversificación de las fuentes energéticas y, por ende, tiene como consecuencia una mayor independencia de los precios internacionales de los energéticos fósiles por lo que las exportaciones e importaciones de los hidrocarburos y su procesamiento interfieren menos en el gasto público con el empleo de la energía solar fotovoltaica. No obstante, en la actualidad, México no produce los componentes que se necesitan para la producción de paneles solares a precios accesibles, por lo que tiene que importarlos a precios que todavía resultan elevados.

De acuerdo con Pimentel de Silva y Castelo Branco (2018, 391), la tecnología de la energía solar fotovoltaica es la conversión de luz solar en electricidad utilizando semiconductores dentro de los paneles fotovoltaicos. La SENER (2016, 117) la definió de otra forma más detallada por medio de la explicación de lo que es el efecto fotovoltaico, “que ocurre cuando los fotones de la luz del sol excitan a niveles de energía más altos a los electrones sueltos de los átomos del material semiconductor sobre el cual incide”. A causa de la interacción entre la luz solar y los elementos del dispositivo, se genera un movimiento de los electrones que resulta en una polarización. Según la capacidad instalada de la energía solar fotovoltaica en 2018, aportaron en un 2.6 % a la generación eléctrica global (Agencia Internacional de Energía, IEA por sus siglas en inglés, 2019b, 12). En cambio, las energías hidroeléctrica y eólica satisficieron en una proporción mayor la demanda de electricidad en 2018: 17 % y 6 %, respectivamente.

El reciente auge fotovoltaico se debe también a la competitividad de esta tecnología, puesto que los precios están cayendo constantemente; Barbuscia (2017, 17) señaló una reducción del costo de 80 % en el periodo de 2009 a 2015. En efecto, se aprecian diversas ventajas de la energía solar fotovoltaica, sobre todo a diferencia de los energéticos no renovables. De esta manera, Barbuscia (2017, 4-5) indicó que esta fuente de energía es inagotable y llega a cualquier parte del mundo. Mediante los estudios previos sobre la intensidad de radiación solar confiable, la cantidad de electricidad generada a lo largo de un año es bastante pronosticable. Durante la operación de una planta fotovoltaica, los costos son bajos por el manejo sin combustibles. El silicio, que es uno de los elementos más frecuentes en la corteza terrestre, es el componente principal para fabricar las celdas solares, aunque existen módulos fotovoltaicos cuyas celdas se basan en otros minerales.

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM 2019), el silicio se extrae en cantidades notables en los estados de Coahuila, Veracruz, Nuevo León y Sonora, por lo que no se tendría que importar este mineral no metálico.

En general, no se emiten contaminantes ni residuos radioactivos; el ruido se genera solamente durante la construcción, pero el funcionamiento de la planta está libre de ruido (Pimentel de Silva y Castelo Branco 2018, 395). Por lo tanto, se constatan varios beneficios para la salud humana (Mundo Hernández *et al.* 2014, 641; Turney y Fthenakis 2011, 3265). Con respecto a la seguridad del personal que labora en estas plantas, se destaca que las temperaturas que alcanzan no significan un peligro para ellos.

Otra gran ventaja es la gran flexibilidad que tienen los sistemas fotovoltaicos debido a su estructura modular, con la que se puede variar el tamaño de los sistemas fotovoltaicos de acuerdo con la superficie disponible o es posible integrarlos en cualquier momento en el techo o en la fachada de un edificio ya existente o que esté en construcción o planeación. Barbuscia (2017, 5) y la Corporación Financiera Internacional (IFC por sus siglas en inglés, 2015, 3) recalcaron una construcción e instalación rápida de una planta fotovoltaica. Se necesitan en promedio de seis a doce meses para su instalación, mientras que la construcción de las centrales hidroeléctricas o de energéticos fósiles puede durar de cuatro a cinco años. Pimentel da Silva y Castelo Branco (2018, 395) precisaron la duración de un proyecto de construcción de las plantas fotovoltaicas; los proyectos con una capacidad instalada entre 1 y 5 megavatios (MW) necesitan hasta 100 días, mientras que 210 días son suficientes para instalar una planta con más de 25 MW.

Sin embargo, el empleo de esta fuente de energía tiene una desventaja: el recurso natural presenta un comportamiento intermitente, por lo que existe una periodicidad o discontinuidad en la generación de este tipo de energía. Esto hace necesaria la utilización de baterías para almacenar energía para contrapesar la ausencia del recurso durante las horas sin insolación, pero su adquisición y mantenimiento es costoso; además, estas baterías emplean el litio, el cual se ha convertido en un recurso mineral estratégico no exento de generar impactos ambientales durante el proceso desde la extracción hasta la fabricación. Pearce (2002, 665) confirmó esto; no obstante, menciona que la conexión a la red de transmisión eléctrica puede posibilitar el almacenamiento de la electricidad producida por la misma infraestructura. Aunque se ha mencionado previamente una cierta confiabilidad en la producción anual de electricidad, durante un día la generación eléctrica puede variar por la dinámica de la atmósfera. Asimismo, hacia las latitudes altas

o durante la inestabilidad atmosférica, la radiación solar decrece notablemente y, por ende, el rendimiento de la planta fotovoltaica disminuye.

A causa de la tecnología requerida, los costos iniciales son altos y ello puede significar un contrargumento para la instalación de un sistema fotovoltaico. Según como se diseñe la planta fotovoltaica, los gastos pueden subir todavía más. Igualmente, es importante mencionar que existe una resistencia por parte de las sociedades y las empresas a la instalación de este tipo de plantas, debido a que su presencia implica un impacto visual; además, requieren terrenos extensos para su instalación y operación, lo cual va acompañado de procesos de mercantilización de la tierra asociados a formas de subordinación y despojo de los pueblos.

Sin embargo, Barbuscia (2017, 1) hizo constar que un sistema fotovoltaico ocupa alrededor de 15 % menos suelo que una central carboeléctrica. Con respecto a la vida vegetal y animal, la implementación de una planta fotovoltaica en un lugar dado puede significar una ruptura en los hábitats de la flora y fauna silvestre, así como en su calidad. Por ejemplo, las vallas para delimitar la planta atraviesan la vegetación o interfieren con las rutas de desplazamiento de animales; además, el uso de herbicidas para evitar el crecimiento de vegetación que podría causar sombreado en los módulos fotovoltaicos implica también un impacto en el ambiente.

Igualmente, los paneles solares ocasionan un albedo por el reflejo de la luz solar en la superficie de las celdas; este albedo puede perturbar a los animales, en específico, las aves. La remoción de la vegetación local y el aumento de las temperaturas resultante puede modificar el microclima del lugar e incluso producir efectos ambientales a nivel regional. Por eso, para la instalación de estas plantas se deben escoger sitios con poca biodiversidad. Finalmente, la dinámica en la planeación urbana con la construcción y transformación en los espacios urbanos significa una dificultad para la integración de sistemas fotovoltaicos en los techos y las fachadas de los edificios, puesto que existe la posibilidad de causar sombreado en los módulos fotovoltaicos y con ello, pérdida de eficiencia en su funcionamiento.

La vida útil de una planta fotovoltaica es de 25 a 30 años (IEA 2015, 15; IFC 2015, 24; Sahu, Yadav y Sudhakar 2016, 820) o 30 años y más (Barbuscia 2017, 5; Turney y Fthenakis 2011, 3264); entonces, un promedio de 30 años de vida útil se puede asumir. Como se ha mencionado anteriormente, la estructura modular de los paneles fotovoltaicos posibilita la construcción de sistemas de diferentes tamaños. Gabler y Mohring (2002, 56)

clasificaron las plantas fotovoltaicas en cuatro rangos (cuadro 1.2) para categorizar éstas según su capacidad instalada, cuyo límite inferior es 1 kilovatio (kW).

Cuadro 1.2. Clasificación de las plantas fotovoltaicas de acuerdo con su capacidad instalada.

Escala	Capacidad instalada	Aplicación
Pequeña	1 – 10 kW	Techos residenciales
Mediana	10 – 100 kW	Techos y fachadas residenciales o comerciales
Grande	100 kW – 10 MW	Generación de electricidad pública e industrial
Muy grande	10 MW o más	Generación de electricidad pública e industrial

Fuente: Elaboración propia con base en Gabler y Mohring (2002).

En cuanto al proyecto de una planta fotovoltaica, la IFC (2015, 10) identificó cinco etapas principales:

- 1) Desarrollo del concepto e identificación de sitios potenciales
  - a. Primer desarrollo del diseño
  - b. Consideración de criterios y restricciones de sitios
- 2) Estudio de prefactibilidad
  - a. Cálculo de ganancias y gastos
  - b. Evaluación del mercado
  - c. Recopilación de permisos necesarios
  - d. Elaboración de cronograma
- 3) Estudio de factibilidad
  - a. Estudio del sitio completado
  - b. Desarrollo del diseño
  - c. Inicio del proceso de adquirir permisos
  - d. Evaluación de opciones para el financiamiento
- 4) Permisos, financiamiento y contratos
  - a. Financiamiento asegurado
  - b. Revisión del diseño
  - c. Planeación de operación y mantenimiento
- 5) Ingeniería, construcción y operación
  - a. Diseño detallado
  - b. Supervisión del rendimiento de la planta fotovoltaica
  - c. Medidas de seguridad.

El proyecto que aquí se presenta se concentra en la primera fase, en específico en la identificación de sitios potenciales para la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes en depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas.

Por lo tanto, es importante identificar los criterios a tomar en cuenta y los requisitos con los que debe contar un sitio y las restricciones que impiden el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en dicho lugar. Arán Carrión *et al.* (2007, 548) dividieron los

criterios en cuatro factores con base en los cuales se clasifican todos los indicadores relevantes. De este modo, los factores ambientales y legales hacen referencia a las restricciones, sobre todo en cuanto al uso del suelo, ya que no se permite la construcción de una planta fotovoltaica en las Áreas Naturales Protegidas y también se quiere evitar la ocupación de suelo fértil para la agricultura. Con respecto a los factores legales, existen varias restricciones, por ejemplo, sitios de patrimonio cultural o lugares asignados para la planeación urbana o la construcción de infraestructura. Dentro de los factores orográficos, el asunto de la pendiente es muy importante, porque una inclinación mayor a 2 % se considera negativamente debido al sombreado que causaría la primera fila de los módulos fotovoltaicos a las detrás. Asimismo, la accesibilidad al terreno y la cercanía a los consumidores son significativos para la localización óptima de una planta fotovoltaica. Por último, los aspectos climatológicos constituyen un factor relevante, pues contienen los registros de la radiación solar, las horas de insolación anual y las temperaturas de un lugar.

Rodrigues, Coelho y Cabral (2017, 247) tuvieron otra opinión que Arán Carrión *et al.* (2007), porque recomendaron una pendiente de alrededor de 5 %; de hecho, hasta el 8 % si hay una orientación hacia el sur para el caso de Portugal. En cambio, mencionaron los mismos criterios importantes que ya se han descrito anteriormente, por ejemplo, la radiación global horizontal, la cercanía a la red eléctrica y la accesibilidad del terreno. Además, tomaron en cuenta un promedio de temperatura más bajo. Los autores enlistaron algunas áreas que no se consideraron en el proceso de la identificación de la localización óptima de una planta fotovoltaica, entre ellas, las Áreas Naturales Protegidas y los cuerpos de agua por su función de suministrar agua potable. Más bien, se valoraron adecuados para la construcción de un sistema fotovoltaico, los suelos desocupados, áridos, infecundos como los baldíos. Por eso, los suelos fértiles para la agricultura o los bosques son inadecuados debido a su función alimenticia o de secuestro del carbono, respectivamente.

De esta manera, Turney y Fthenakis (2011, 3263) recalcaron que las áreas desérticas son las más apropiadas, porque presentan una menor densidad de biomasa y una menor nubosidad en comparación con los bosques, las praderas y los matorrales. Xiao *et al.* (2013, 6) se concentraron en el estudio de los desiertos y determinaron la cantidad de radiación solar, la orientación de los paneles solares y la temperatura del ambiente como los criterios con más peso. En el cuarto lugar pusieron el uso del suelo que, según los autores, tiene un valor más bajo.

Sánchez Lozano *et al.* (2013, 551) hicieron una clasificación en cuatro categorías parecida a la de Arán Carrión *et al.* (2007). Por medio de un método de ponderación, identificaron además la importancia de cada una y los indicadores correspondientes. La categoría de localización tuvo la mayor significancia, en especial, la distancia hacia la red de transmisión eléctrica fue lo que más importa, ya que las distancias a las carreteras y poblados pasaron a segundo plano. Después siguió la categoría del clima, en la cual el potencial de radiación solar es el indicador más decisivo, a diferencia de la temperatura media. En cuanto a la orografía, tomaron en cuenta la pendiente del terreno, su orientación y el área disponible. Por último, la capacidad de uso del suelo dentro de la categoría del ambiente fue incluida en la toma de decisiones.

La IFC (2011, 58-64) también concretó los criterios de un sitio que se deben considerar para la instalación de una planta fotovoltaica. Con referencia al recurso solar, un promedio anual alto de radiación global horizontal es muy importante. Además, el diseño del sistema fotovoltaico se desarrolla de acuerdo con las trayectorias del Sol a lo largo de un año con el fin de evitar el sombreado. El área que se necesita para un rendimiento alto varía con la latitud del sitio y la eficiencia de los módulos fotovoltaicos. Por ejemplo, en India -que se ubica en latitudes similares que México- se requieren de 1 a 2 ha para la producción de 1 MW, dependiendo del material con el que se construyeron los paneles. Asimismo, se toman en cuenta las condiciones climáticas y los eventos atmosféricos que pueden limitar la productividad, así como las inundaciones, los vientos muy fuertes, las temperaturas altas extremas, el mayor contenido de sal en la atmósfera cerca de la costa o la nieve, que significan un peligro de daños para la construcción. Con respecto a la topografía, el sitio debe ser llano, porque una mayor inclinación del terreno implica mayores gastos para realizar la cimentación del terreno y la estructura. Aparte de las restricciones de lugares como Áreas Naturales Protegidas, patrimonio cultural o corredores ecológicos, el valor del suelo debe ser bajo y asegurar una ocupación durante 30 años, ya que es la vida útil de una planta fotovoltaica.

Asimismo, las condiciones geotécnicas juegan un rol significativo por el riesgo de actividad sísmica, deslizamientos de tierra o hundimientos del suelo, y por la existencia de acuíferos o yacimientos minerales. En cuanto a la accesibilidad del sitio, la infraestructura carretera o la proximidad y la capacidad de la red de electricidad, se adecúa a las necesidades si no es la apropiada. Los paneles fotovoltaicos requieren una limpieza durante su operación para garantizar su productividad. Por lo tanto, la disponibilidad de agua, que debe ser limpia y baja en minerales, es importante, porque cada metro cuadrado



(m<sup>2</sup>) de módulos necesita 1.6 litros de agua para su lavado. En general, lugares que presentan un posible ensuciamiento excesivo de los módulos, por ejemplo, la alta concentración de polvo en la atmósfera o la excreción de aves, son menos adecuados para la localización de una planta fotovoltaica. Finalmente, las regiones perjudicadas por conflictos geopolíticos ponen en duda el sentido de una construcción de este tipo.

Los diferentes autores coinciden en estos criterios, aunque cada uno enfatiza en ciertos indicadores. Mientras que se observan posturas distintas con respecto a la pendiente del terreno, todos ellos recalcan la importancia de las condiciones climáticas, la conservación de sitios altamente biodiversos y la distancia hacia la red eléctrica.

Después de concretar los criterios para la selección de un sitio adecuado, es necesario aludir a algunas características de la tecnología fotovoltaica. Sahu, Yadav y Sudhakar (2016, 816-817) describieron cinco tipos de instalaciones que se utilizan para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. Las plantas convencionales están montadas y fijadas en tierra mediante los cimientos y suelen ser de una escala grande o muy grande. Las construcciones en los techos de edificios son de escala pequeña o mediana, puesto que el área disponible es limitada. En contraste, existen obras que evitan la ocupación de suelo valioso, por lo que se construyen sobre o encima de cuerpos de agua. Por ejemplo, un sistema fotovoltaico se fija en los dos lados de la orilla de un canal y cubre éste; se especifica que es un canal, porque un río con sus meandros dificultaría la instalación. Igualmente, las plantas fotovoltaicas en el mar abierto o litoral están en servicio, aunque se exigen ciertas medidas para protegerlas del agua salada o de la incidencia de fenómenos marítimos y climáticos. El paso de transporte marítimo o la práctica de la pesca en el lugar también se deben considerar, puesto que pueden interferir con el funcionamiento de las plantas fotovoltaicas. Por último, los sistemas flotantes en cuerpos de agua como lagos, lagunas o plantas tratadoras de agua son construcciones que pueden flotar sobre o estar en contacto directo con el agua, y todavía cuentan con poca experiencia de uso comercial. Su aplicación se valora en países con poco terreno disponible como Japón, Corea del Sur o Singapur.

Los cuerpos de agua suelen tener una geometría irregular, por lo que la extensión y forma de la planta flotante se ajusta a ésta. Debido a la utilización de plásticos para posibilitar la flotación de la obra, la calidad del agua se puede deteriorar. Asimismo, la planta fotovoltaica impide la penetración de la luz solar, lo que tiene como consecuencia una posible afectación a las especies vegetales y animales del cuerpo de agua. El cableado

para transportar la electricidad generada puede causar accidentes eléctricos por la interacción dañina entre el agua y la electricidad del sistema (Arroyo Sáez 2017, 21). También, el agua desgasta la estructura flotante por el contacto permanente. Dado que el agua tiene movimiento, la posición de la planta fotovoltaica flotante no es fija, por lo que se emplea un sistema de amarre. Otro desafío es la mayor humedad relativa a la que está expuesta la construcción por la presencia del cuerpo del agua. Por último, se deben considerar las olas y el viento, éste puede causar el movimiento o rotación de la estructura (Choi 2014, 81), que en promedio se desplaza alrededor de 5 metros (m). A pesar de los desafíos e inconvenientes mencionados, los sistemas fotovoltaicos flotantes cuentan con diversas ventajas que se explican más adelante.

Una planta fotovoltaica se constituye de varios componentes que se pueden clasificar en dos grupos: los eléctricos y los de soporte físico. En el primer grupo se encuentran los paneles solares, que también se denominan módulos solares o fotovoltaicos. Cada panel se conforma de una multitud de celdas o células, cuya superficie convierte la radiación solar incidente en electricidad. Luego, el convertidor es necesario para cambiar la corriente continua (DC) a corriente alterna (AC), mientras que el transformador de voltaje aumenta éste para adecuarlo a poder transmitir la electricidad. En el segundo grupo, la estructura de montaje soporta los paneles solares y está hecha de un marco de aluminio, acero inoxidable o cromado, plástico o hierro. El cimiento, que es la base, es resistente a los vientos y soporta todo el peso de la construcción. También, se requiere un cableado por el que se transmite la electricidad generada; la construcción de caminos en la planta fotovoltaica posibilita la colocación del cableado y el paso para el personal de limpieza, mantenimiento y revisión.

En cambio, los sistemas fotovoltaicos flotantes carecen de cimientos y de la estructura de montaje, porque se necesita un sistema flotante que también se llama pontón y suele estar formado por plástico o polietileno de alta densidad. Para evitar el desplazamiento de la planta flotante, se instalan un anclaje y un sistema de amarre, que se pueden adaptar a los cambios en el nivel del agua. El cableado difiere en el hecho de que son cables submarinos. Los componentes eléctricos son los mismos como en el caso de la construcción en tierra. Por eso, la misma área genera una igual cantidad de energía en plantas fotovoltaicas terrestres y flotantes. De acuerdo con Pimentel da Silva y Castelo Branco (2018, 392), entre 0.89 a 4.94 hectáreas (ha) eran obligatorios para producir cada MW de energía solar fotovoltaica, dependiendo de la eficiencia energética de los módulos

solares. Liu *et al.* (2017, 1137) indicaron una superficie de alrededor de 8 m<sup>2</sup> por cada kW generado.

La eficiencia energética o el rendimiento de los paneles solares se rige por el material del que se conforman éstos (cuadro 1.3). Los módulos se dividen en los que son de silicio cristalino (c-Si) y los que se constituyen de capas delgadas de diversos minerales. Las celdas de silicio se subdividen en monocristalinas y policristalinas; las monocristalinas son partes delgadas de un cristal de silicio, mientras que las policristalinas forman un bloque de varios cristales de silicio. Por su pureza, una célula monocristalina es más cara, pero también más eficiente. Según el IPCC (2012, 352), su eficiencia radicó entre 14 a 20 %; en cambio, una celda policristalina llega a un rendimiento de 12 a 14 %. La IFC (2015, 23) indicó una eficiencia energética de 13 a 21 % para los dos tipos. Los paneles de capas delgadas (*thin film* en inglés) se conforman de cadmio-telurio (CdTe), cobre-indio-galio-selenio (CIGS) o silicio amorfo (a-Si). Su eficiencia radica entre 6 y 16 % (IFC 2015, 23) y entre 10 y 13 % (IPCC 2012, 352). Aparte de ser más económicos y menos eficientes estos paneles, se critica el uso de algunos de esos minerales, porque el telurio y el indio son escasos y el cadmio es tóxico.

Como se ha mencionado previamente, el incremento de la temperatura del ambiente provoca una reducción de la eficiencia energética. Cabe destacar que ese efecto es menor en las celdas de capas delgadas: menos de 0.11 % por cada grado centígrado (°C) (Barbuscia 2017, 35). Asimismo, la IEA (2015, 45) determinó una mayor pérdida de electricidad producida en las celdas de silicio cristalino por el aumento de la temperatura. Por su parte, existen también las celdas orgánicas que se conforman de polímero, las cuales todavía están en prueba y, por ende, aun no se utilizan comercialmente.

Cuadro 1.3. Clasificación, eficiencia energética y pérdida de ésta en los paneles solares.

Material	Minerales	Eficiencia energética (%)		Pérdida (%) de eficiencia por cada °C (a partir de 25 °C)		
		IFC	IPCC	Barbuscia	IEA	Liu <i>et al.</i>
Silicio cristalino	Monocristalino	13 - 21	14 - 20	0.40	0.50	0.45
	Policristalino		12 - 14			
Capa delgada ( <i>thin film</i> )	Cadmio-telurio	6 - 16	10 - 13	-	0.29	-
	Cobre-indio-galio-selenio					
	Silicio amorfo			0.11		

Fuente: Elaboración propia con base en IFC (2015), IPCC (2012), Barbuscia (2017), IEA (2015) y Liu *et al.* (2017).

Los paneles solares se pueden instalar de dos maneras diferentes; en este sentido, los marcos que rebordean los módulos pueden ser fijos o flexibles. Los marcos fijos, con o

sin una inclinación de los paneles, son más baratos y fáciles de colocar, no obstante, son menos eficientes. En cambio, los marcos flexibles se mueven con respecto a la posición del Sol, por lo que se denominan también como rastreadores de luz solar. La IFC (2015, 34) publicó un gráfico que demuestra el mayor aprovechamiento sobre todo en las primeras y últimas horas de la insolación. Esto se debe al hecho de que la inclinación de los paneles solares siempre es perpendicular a la ubicación del Sol, por lo que se recibe una intensidad mayor de radiación solar. El seguimiento de la luz solar significa un mayor gasto inicial al igual que el mantenimiento debido a las fallas técnicas que se causan durante su operación. En el caso de un sitio en el hemisferio norte, los módulos están inclinados hacia el sur, mientras que en el hemisferio sur es hacia el norte.

Mientras que se desarrollan nuevas innovaciones tecnológicas para aumentar el rendimiento de los paneles solares, existen varios sucesos que disminuyen su eficiencia energética de manera directa e indirecta (IEA 2015, 45). Aparte del incremento de la temperatura del ambiente que ya se mencionó, los aerosoles y contaminantes en la atmósfera absorben, dispersan y reflejan las ondas solares, por lo que los módulos reciben una menor cantidad de radiación solar. Igualmente, la humedad relativa influye en la intensidad de la luz solar. En cuanto a las nubes, los cirros son prácticamente transparentes para las ondas de longitud corta, posteriormente, no intervienen en el rendimiento de los paneles solares.

En cambio, los estratocúmulos y cumulonimbos provocan pérdidas en el aprovechamiento de la radiación solar. El viento, el granizo o las heladas pueden ocasionar daños físicos en una planta fotovoltaica. Por último, el ensuciamiento de los módulos por polvo o arena en la atmósfera disminuye su eficiencia también, puesto que cubren el área de éstos. Por eso, la localización de un sistema fotovoltaico en las zonas áridas y semiáridas, por ejemplo, en un desierto, debe tomar en cuenta las acciones para evitar las pérdidas de producción energética debido al mayor ensuciamiento o los golpes por tormentas de arena. Xiao *et al.* (2013, 1) destacaron los desiertos como sitios propensos para la instalación de una planta fotovoltaica, ya que reciben una alta cantidad de radiación solar debido a la menor humedad relativa y, por consiguiente, nubosidad. Asimismo, el uso del suelo tiene un valor bajo en comparación con los suelos fértiles y aptos para la agricultura, construcción de edificios o tipos de vegetación densa.

### 1.3. Minería

Antes de explicar esta actividad económica, se alude a la materia prima que permite la práctica de la minería. De forma general, un recurso natural es un elemento del medio físico que puede ser aprovechado por el ser humano, cuando su valor depende de la sociedad, de la época y la tecnología disponible (Franco González 2017). De acuerdo con Sánchez Cabrera (2016), un mineral es un elemento o compuesto sólido, natural e inorgánico con propiedades físicas y químicas perfectamente definidas. Entonces, los recursos minerales son elementos o compuestos naturales con cierto valor de uso para el ser humano, pero a diferencia de otros recursos naturales, por ejemplo, de la flora y la fauna, los minerales implican procesos geológico-tectónicos de periodos muy largos para su formación, que se caracterizan por altas temperaturas y presiones como la disolución por la acción química del agua en el subsuelo (Coll Hurtado, Sánchez Salazar y Morales Ramírez 2002, 16; Franco 2017).

Aunque toda la superficie de la Tierra se compone de minerales, su potencial de aprovechamiento para un beneficio económico depende de una concentración explotable. Cuando se cumple esta condición, se habla de yacimientos o depósitos minerales (Coll Hurtado, Sánchez Salazar y Morales Ramírez 2002, 15). Desde el punto de vista económico, los minerales se categorizan en tres grupos, los cuales se subdividen a su vez en tres clases (cuadro 1.4).

Cuadro 1.4. Clasificación económica de los minerales.

Minerales metálicos	Preciosos	Oro, plata, platino
	Industriales no ferrosos	Cobre, plomo, zinc, aluminio, titanio, mercurio
	Industriales ferrosos	Hierro, manganeso, tungsteno
Minerales no metálicos	Construcción	Yeso, caliza, arena, grava, mármol, granito
	Industriales	Azufre, fluorita, cuarzo, sal, fosfatos, arcillas
	Gemas	Diamante, ópalo, esmeralda, rubí, topacio, granate
Energéticos	Carbón	Turba, lignito, hulla, antracita
	Hidrocarburos	Petróleo, gas natural
	Radioactivos	Uranio, torio

Fuente: Elaboración propia con base en Sánchez Salazar (2016-2017).

La minería comprende el aprovechamiento de los minerales y se puede clasificar como una actividad primaria o secundaria. La Cámara Minera de México (CAMIMEX 2012a) lo definió como la extracción de minerales, por lo que se puede considerar ubicada

en el sector primario debido a la falta de un procesamiento del recurso. Menos evidente lo delimitó la RAE (2019b), porque se describe como el “arte de laborear las minas”. En cambio, la geógrafa Sánchez Salazar (2016-2017) indicó que la minería implica la extracción y el beneficio primario de los minerales y, por consiguiente, es una actividad secundaria. Por lo tanto, se constata que la asignación de la minería en el espectro de las actividades económicas se rige por su enfoque en la definición. A causa de la cercanía espacial de la mina y la planta de beneficio, que en conjunto se entienden como una unidad minera, se clasificará la minería en el sector secundario para esta investigación. De este modo, la minería es la actividad extractiva de recursos minerales y la transformación subsecuente de éstos para concentrar el material de interés.

Como se mencionó anteriormente, las sociedades y las empresas industriales y manufactureras determinan la demanda de los minerales debido a su estilo de vida y modos de producción, respectivamente. Entonces, vale la pena mostrar en dónde se necesitan exactamente los minerales, de acuerdo con el Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED por sus siglas en inglés, 2003, 64-67). Aunque se asocian el oro y la plata sobre todo con la joyería y la ornamentación, cabe destacar que el oro se utiliza como reserva de valor, así como en la electrónica y odontología, mientras que la plata tiene aplicaciones en la fotografía, baterías, electrónica, monedas y vidrios. El cobre se usa comúnmente para fabricar cables, en la construcción, piezas para la industria automotriz, muebles y artesanías. Igualmente, el plomo sirve para revestir cables, instalaciones sanitarias y fabricar municiones. Además de funcionar como materia prima para producir el óxido de zinc que se usa en cosméticos, fármacos y jabones, el zinc se emplea en las baterías, techumbres y la purificación del agua. El aluminio se aplica en la farmacéutica, la construcción y la fabricación de partes de vehículos y carros de ferrocarriles. Para la producción de acero y aleaciones se requieren el hierro y el manganeso. Con respecto a los minerales no metálicos, el yeso se utiliza en la construcción y la agricultura, así como en la producción de compuestos químicos. Las arcillas, la arena y la grava también son materiales de construcción, de esta manera se encuentran en concreto y ladrillos. Los fosfatos tienen un uso muy diverso, por ejemplo, se destinan a la producción de fertilizantes, detergentes, alimentos, bebidas, papel, vidrio, telas sintéticas, fármacos, cosméticos y para el tratamiento de agua. Las gemas tienen exclusivamente un valor estético y, por ende, son importantes para la joyería. Finalmente, los energéticos sirven para la producción de energía. Cabe destacar que los minerales mencionados son

muy conocidos e importantes, pero solamente unos pocos de los miles que hay en todo el mundo.

La minería se clasifica en diferentes escalas de acuerdo con el tamaño de la empresa, el capital disponible, el grado de innovación tecnológica, el valor y el volumen de la producción del mineral o la cantidad del personal: grande (figura 1.1), mediana (figura 1.2), pequeña y el gambusinaje. La gran minería requiere el consumo de grandes cantidades de agua, energía y combustibles a causa del volumen de producción y del equipamiento más avanzado y potente. Pero también tiene la capacidad económica para atender el cuidado del ambiente a lo largo de cada fase minera. Coll Hurtado, Sánchez Salazar y Morales Ramírez (2002, 105) estructuraron la minería en cuatro etapas de desarrollo (cuadro 1.5).

Figura 1.1. Ejemplo de la gran minería: Panorámica de la unidad minera Fresnillo, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Figura 1.2. Ejemplo de la minería mediana: Panorámica de la unidad minera Del Toro en Chalchihuites, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Cuadro 1.5. Fases de desarrollo de la minería.

Fase	Tareas
Exploración	Prospección del tipo de yacimiento
	Evaluación de las reservas
	Estudio de factibilidad
	Diseño de la mina
Desarrollo y puesta en marcha del proyecto	Construcción de acceso a yacimientos (tiros, socavones) para minas subterráneas o Remoción de vegetación, suelo y material estéril para minas a cielo abierto
	Construcción de infraestructura (vías de acceso, obras para suministro de agua y energía eléctrica)
Operación	Extracción de minerales
	Procesos de beneficio (molienda, flotación, lixiviación, cianuración, fundición)
	Supresión de residuos y contaminantes (mediante depósitos de jales y terreros)
Cierre o abandono	Restauración y rehabilitación del lugar después de la operación

Fuente: Elaboración propia con base en Coll Hurtado, Sánchez Salazar y Morales Ramírez (2002).

El tipo de diseño de la mina se rige por la ley de mineral, en la cual se establece que una alta concentración del mineral significa la construcción de una mina subterránea (mineral de alta ley). Por el contrario, el minado a cielo abierto se realiza a causa de la baja concentración de un mineral, que se presenta cuando el yacimiento está diseminado (mineral de baja ley). De hecho, se asume que hasta el 80 % de toda la masa de roca extraída son desechos debido a la dispersión del mineral (Coll Hurtado, Sánchez Salazar y Morales Ramírez 2002, 108). Asimismo, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA 2011, 3) enfatizó en que las minas a cielo abierto pueden alcanzar “volúmenes de generación de residuos superiores a 10 veces por unidad de mineral procesado, los que pueden contener elementos potencialmente peligrosos o ser peligrosos, y representar un alto riesgo a la población, al ambiente o a los recursos naturales”.

Los procesos operativos en las unidades mineras se consideran altamente consumidores de energía. Por un lado, ello se debe a la automatización de todos los procesos, aunque cabe mencionar que la disposición de tecnología avanzada es proporcional al capital y a las inversiones con las que cuenta una empresa minera. Por otro lado, la maquinaria funciona durante las 24 horas del día; en efecto, se supone que nunca se paran los procesos. De acuerdo con Rothen Véliz (2015, 28), las minas



subterráneas requieren mayor consumo de energía que las minas a cielo abierto por el acarreo, el bombeo de agua y la ventilación en los túneles. La figura 1.3 enseña la entrada a una mina subterránea. No obstante, en los tajos a cielo abierto predomina la adquisición de combustibles como el diésel para el transporte.

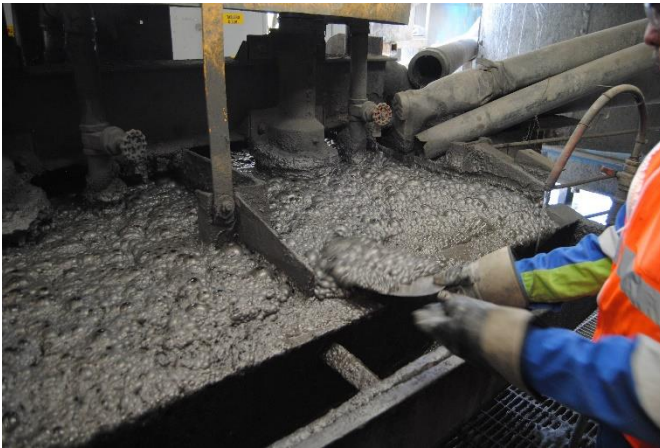
Figura 1.3. Acceso a la mina subterránea mediante el tiro de color amarillo en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Mientras que las minas se distinguen en cuanto a su diseño y producción, las plantas de beneficio son iguales en ambos casos. De acuerdo con la PROFEPA (2011, 4), el proceso de beneficio implica todas las labores “para preparación, tratamiento, fundición de primera mano y refinación de productos minerales [...] con el propósito de recuperar u obtener minerales o sustancias, al igual que de elevar la concentración y pureza de sus contenidos”. Por ejemplo, la flotación, que se muestra en las figuras 1.4 y 1.5, concentra los minerales suspendidos en agua mediante procesos fisicoquímicos, en los cuales se cambian algunas de sus características. Entonces, aparte de la energía, este tipo de beneficio necesita grandes cantidades de agua. Sin embargo, la minería no consume solamente altas cantidades de insumos, sino produce volúmenes notables de desechos. De este modo, la PROFEPA (2011, 1) sostuvo que “la minería es una actividad que se caracteriza por su alto volumen de generación de residuos, algunos de ellos potencialmente tóxicos, los cuales pueden constituir un riesgo a la salud y al medio ambiente, en caso de ser manejados de manera inadecuada”.

Figuras 1.4 y 1.5. Proceso de flotación en la planta de beneficio de la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Este proyecto se enfoca en la fase operativa de las unidades mineras, porque su objetivo es estudiar el potencial que tienen los depósitos de jales para aprovechar la energía solar fotovoltaica. Mientras que los depósitos de jales manejan los desechos de los sistemas de beneficio, por ejemplo, los reactivos químicos no recuperables, los terreros son el producto de la remoción de grandes masas de tierra, de la vegetación y del material estéril, que son componentes sin aprovechamiento para las empresas, para posibilitar el acceso a los yacimientos minerales.

El manejo de los residuos es un tema muy importante, ya que los efectos ambientales de la minería son evidentes. *Grosso modo*, todas las unidades mineras confrontan problemas por la contaminación del agua (subterránea y superficial), aire (por polvos y componentes derivados de las explosiones), suelo y subsuelo. En el caso de las minas subterráneas, los impactos se constatan en el abatimiento de mantos freáticos, la desecación de manantiales y el hundimiento del terreno, así como en la peor calidad del agua subterránea. Con respecto a las minas a cielo abierto, éstas modifican notablemente el paisaje y el relieve debido a la formación de terreros y de los tajos. Asimismo, se vuelve más vulnerable el terreno a los fenómenos de la erosión eólica e hídrica por la desaparición de la vegetación y del suelo; además, se pierde el hábitat para la flora y fauna. A causa de los hechos señalados, la actividad minera afecta a las comunidades locales en cuanto a la salud y al desplazamiento forzado de los habitantes en el marco de múltiples conflictos socioterritoriales.

## Depósitos de jales

Debido a lo mencionado previamente, la gestión adecuada de los desechos es importante para no perjudicar a la sociedad ni al ambiente. Esta investigación se refiere a los depósitos de jales (figura 1.6), aunque se maneja principalmente la expresión ‘presas de jales’. La CAMIMEX (2011, 19) cuestionó ésta y propuso cambiarla por depósitos de jales. Esa observación surgió, porque una presa hace referencia a una construcción que conserva el agua. No obstante, la CAMIMEX (2011, 19) y la PROFEPA (2004, 5) la definieron como una “obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente”. En efecto, el agua suele recircular y, por ende, tener otro uso además del simple almacenamiento, por lo que se comprende la validez del término de ‘presa’; pero los jales, que son desechos sólidos de la extracción de minerales en las minas y su procesamiento consecutivo en las plantas de beneficio, son el motivo de tal construcción con el propósito primordial de depositar los residuos en un lugar donde no afecten el ambiente y/o a las comunidades aledañas. Igualmente, la PROFEPA (2004, 2) lo confirmó, puesto que “son uno de los sistemas para la disposición final de los residuos sólidos generados”. En algunas fuentes chilenas, se utiliza también ‘depósitos de relaves’ o ‘relaves mineros’, mientras que en la literatura anglófona o alemana se emplea el concepto de *tailings*.

La localización de los depósitos de jales por parte de la empresa minera debe ser el resultado de una toma de decisiones responsable y bien reflexionada. En ese sentido, el sitio para su instalación debe cumplir con algunas características, por lo que se analizan las condiciones de los lugares posibles (cuadro 1.6).

Figura 1.6. Depósito de jales en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Cuadro 1.6. Principales factores considerados para evaluar la aptitud de un sitio para instalar un depósito de jales.

Factores					
Climáticos	Topográficos	Edafológicos	Geotécnicos	Hidrológicos	Biogeográficos
Precipitación media mensual y anual	Terreno plano, de lomerío o montañoso	Tipo de suelo	Permeabilidad de formaciones rocosas	Escurrimiento medio anual	Flora y fauna silvestres en riesgo
Precipitación máxima y mínima				Áreas de inundación	
Velocidad, dirección y frecuencia de los vientos		Textura	Región sísmica	Parámetros físicos y químicos del agua	Ecosistemas frágiles o únicos
	pH	Presencia de acuíferos			

Fuente: Elaboración propia con base en PROFEPA (2004).

Los factores climáticos hacen referencia sobre todo a la evaluación del riesgo de un derrame de residuos mineros como producto de la precipitación o del viento. En cambio, el terreno y el suelo importan en cuanto al diseño de la construcción. Los aspectos geotécnicos influyen en la elección del sitio, puesto que la actividad sísmica o las fisuras rocosas pueden destruir la obra. Las condiciones de las aguas superficiales, en especial el escurrimiento, pueden contribuir a un derrame, mientras que el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales en el entorno sirve para detectar posibles daños derivados de un depósito de jales en operación.

Finalmente, los factores biogeográficos tienden a descartar lugares potenciales desde el principio para no perjudicar los ecosistemas vulnerables o registrar las especies vegetales y animales posiblemente afectadas. La importancia de tomar medidas precautorias radica en el hecho de que los residuos mineros contienen contaminantes tóxicos; por ejemplo, el cadmio, el cromo, el mercurio, la plata o el plomo. La PROFEPA (2011, 9) determinó los límites máximos permisibles de cada 1 de los 10 elementos peligrosos para prevenir daños eventuales. Por medio de la estabilización química se suprime el drenaje ácido, que es el resultado de la oxidación de minerales sulfurosos exhibidos. De esta manera, Romero *et al.* (2008, 44) indicaron que los “jales contienen sulfuros metálicos residuales [...] que son la fuente de elementos potencialmente tóxicos” y, por ende, el tratamiento del contenido de los depósitos de jales es una estrategia para reducir su potencial para dañar el ambiente.

La configuración de los depósitos de jales está reglamentada en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes. Las tres estructuras más relevantes son el vaso de almacenamiento, la cortina contenedora y el sistema decantador drenante, que funcionan como el contenedor, la capa impermeable y la tubería para reutilizar el agua usada, respectivamente. El vaso de almacenamiento debe tomar en cuenta en su diseño y construcción el “volumen disponible para almacenar los sólidos de los jales, una porción del agua empleada en su transporte y el volumen para manejar las aguas pluviales que caen dentro de la presa de jales” (PROFEPA 2004, 6). Este contenedor tiene una cubierta que se denomina cortina contenedora, que impide la infiltración de residuos mineros o agua contaminada en el suelo y el subsuelo. Por último, el sistema decantador drenante comprende una red de tuberías con la que se posibilita el transporte del agua empleada en los depósitos de jales hacia su recuperación para tratarla y recircularla en los procesos mineros. En efecto, la reutilización del agua es una medida sustentable, porque se trata de reducir el consumo de ésta. De este modo, la PROFEPA (2011, 10) señaló que el aprovechamiento de los residuos mineros no debe “liberar contaminantes al ambiente ni constituir un riesgo para la salud, y habrán de promover el ahorro de energía y de materias primas”. Esto se vuelve importante también en el caso de las unidades mineras cerradas, en las cuales se aplican comúnmente acciones para cubrir los depósitos de jales con el suelo recuperado y obras de reforestación.

#### **1.4. Cambio climático**

Dentro de la geografía física, la climatología estudia el clima de la Tierra y sus modificaciones, para lo cual se consideran los elementos climáticos de los que se compone el clima, los factores que condicionan éste y los fenómenos que se producen en la atmósfera. De acuerdo con Gómez Mendoza (2018), el clima es el “conjunto promedio de los estados de la atmósfera en un cierto periodo de tiempo en un lugar dado”, cuando el periodo implica siempre un lapso de 30 años y más. Los elementos del clima se pueden distinguir entre los acuosos y los termodinámicos: la humedad relativa, la nubosidad, la precipitación y la presión atmosférica, el viento, la temperatura, respectivamente. Con respecto a los factores climáticos, la latitud, la altitud, el relieve, la cercanía al mar y las corrientes marinas influyen en el clima de manera significativa.

A pesar de una estabilidad de esos factores, el clima es un sistema dinámico que presenta variaciones por su complejidad a causa de las interacciones entre la atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera. Como consecuencia, los cambios en el clima son un tema de interés, y actualmente el tema del cambio climático antrópico es debatido y discutido a nivel mundial. El concepto del cambio climático significa una alteración “en el estado del clima que persiste durante un periodo prolongado y que se debe tanto a la variabilidad natural como a la atribuida por la actividad humana” (Gómez Mendoza 2018). En 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés) lo definió en el artículo 1 como el cambio del clima que es atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera global además de la variabilidad climática natural observada durante periodos de tiempo comparables (IPCC 2014, 120). En efecto, es indispensable diferenciar entre la variabilidad climática natural y el cambio climático antrópico. Por una parte, existen varios procesos físico-naturales que modifican el clima global. Por ejemplo, cada once años varía la intensidad de los vientos o manchas solares, resultado de una mayor intensidad en la actividad solar.

Asimismo, la erupción de volcanes ocasiona un enfriamiento del aire debido a la reducción de la radiación solar por el incremento de cenizas y gases en la atmósfera. Otro ejemplo es el movimiento de los continentes, puesto que provocan un impacto direccional en las corrientes marinas o en la posición de las masas glaciares. Igualmente, los cuerpos celestes, por ejemplo, los asteroides grandes, pueden causar un efecto sombrilla, que significa una disminución de la radiación solar. Ésta se altera también por la inclinación del eje terrestre, ya que los rayos solares llegan en un ángulo diferente a la Tierra y, entre más oblicuos llegan los rayos solares a la superficie terrestre, la intensidad de la insolación es menor. Se asume un cambio en la inclinación del eje terrestre constante entre los  $21.8^\circ$  y  $24.4^\circ$ . Otro factor que modifica la cantidad de radiación solar que recibe la Tierra son los ciclos de Milankovitch, que consisten en las variaciones en la excentricidad de la órbita terrestre en un periodo largo de tiempo debido a los movimientos del planeta, en los cuales se puede notar que la Tierra varía en su circunferencia orbital, cuya consecuencia es una posición diferente y, por consiguiente, una distancia mayor o menor con respecto al Sol.

Todos los procesos mencionados se llevan a cabo durante periodos muy largos, por lo que los ecosistemas, que albergan la vida vegetal y animal, disponen del tiempo suficiente para adaptarse a las nuevas condiciones. A causa de las actividades humanas, se asume una contribución notable en el aumento de la temperatura global. Éste sucede a

una velocidad mayor a la que se presentaban las variaciones anteriores, en consecuencia, su impacto en los ecosistemas se intensifica y provoca un deterioro irreversible.

La emisión de gases de efecto invernadero por la combustión de fósiles y la deforestación o la pérdida de vegetación en general son las dos actividades humanas que más perjudican al ambiente. Por un lado, la mayor concentración de esos gases implica un aumento en la temperatura global, debido al potencial de calentamiento que tienen los gases en la atmósfera. Por otro lado, la falta de sumideros naturales para la captación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sobre todo los bosques, las praderas, la degradación del suelo, entre ellos, impide la eliminación de los gases de efecto invernadero y, por ende, refuerza el calentamiento global.

En efecto, el IPCC (2014, 44) informó sobre un aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero grave en la atmósfera desde 1750: el CO<sub>2</sub> en un 40 %, el metano (CH<sub>4</sub>) en un 150 % y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en un 20 %. De hecho, en el periodo de 2000 a 2010 se registraron las mayores concentraciones de esos gases, lo que explica la actuación reciente de las autoridades en cuanto a la introducción de políticas de carácter ambiental-ecológico. El 78 % del incremento total de las emisiones de gases del efecto invernadero en el periodo de 1970 a 2010 se asoció a la combustión de fósiles y procesos industriales (IPCC 2014, 46). En 2010, las emisiones de origen antrópico se conformaron de la siguiente manera: el CO<sub>2</sub> constituyó el 76 % de las emisiones de gases de efecto invernadero totales, mientras que el CH<sub>4</sub> aportó un 16 % y el N<sub>2</sub>O un 6 %; el resto (2 %) fueron gases fluorados. En sentido inverso se comporta el potencial de calentamiento, puesto que el N<sub>2</sub>O y el CH<sub>4</sub> tienen, respectivamente, 265 veces y 28 veces más potencial que el CO<sub>2</sub>.

Aparte de la mayor concentración de los gases de efecto invernadero, los impactos del calentamiento global acelerado por el cambio climático antrópico, que registra un incremento de la temperatura superficial terrestre y oceánica de 0.85 °C de 1880 a 2012 (IPCC 2014, 40), ya están visibles. De este modo, en los océanos se observa un blanqueamiento y una mortalidad de corales con mayor frecuencia, así como un desplazamiento de especies vegetales y animales debido a los cambios de temperatura.

Con respecto a la criosfera, los glaciares experimentan una reducción de su extensión, masa y volumen. Así que, en el Ártico disminuyen constantemente a partir de 1979, y es en los veranos cuando la disminución es más rápida. En general, en el hemisferio norte se registró una reducción de la extensión de las capas de nieve en un 11.7 % por década en junio de 1967 a 2012. Asimismo, la extensión y el grosor del permafrost

decrecieron durante los últimos 30 años a causa del incremento de las temperaturas en las zonas correspondientes. Todo lo mencionado previamente, tiene consecuencias para el nivel del mar. Se asume que, desde 1970, el 75 % de su aumento se debió a la pérdida de masa glaciaria y la expansión térmica de los océanos por el calentamiento global (IPCC 2014, 42). En el periodo de 1901 a 2010, el nivel del mar se elevó 0.19 m.

Aunado a los registros confiables, la intensificación de los eventos atmosféricos extremos provoca una sensación de que el cambio climático afecta negativamente la salud humana y las actividades económicas. De esta manera, se percibe que los fenómenos suceden con mayor frecuencia, por ejemplo, los ciclones tropicales de categoría 5, las lluvias torrenciales más fuertes que ocasionan inundaciones, sequías y heladas más prolongadas, etcétera. El calentamiento global o el aumento constante de la temperatura en el planeta se identifica como el factor fundamental que desencadena esa serie de sucesos que perjudica el ambiente y las sociedades en el mundo. Por eso, en 2010, los países que signaron en los Acuerdos de Cancún determinaron un aumento máximo de 2 °C en relación con los registros de la época preindustrial.

En la actualidad, existen dos estrategias para confrontar el cambio climático antrópico. Por una parte, la mitigación hace referencia a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero por medio de dos acciones: restringir las fuentes productoras de esos gases o difundir los sumideros de carbono (IPCC 2014, 125). Por otra parte, la adaptación es la adecuación a los impactos del cambio climático, que implican moderar o evitar los daños (IPCC 2014, 118). Aparte de evitar la deforestación y cambiar el uso del suelo hacia un uso apropiado a su potencial natural, la producción de energía a partir de fuentes renovables es una estrategia eficiente para mitigar el calentamiento global. La IEA (2015, 15) señaló que los sistemas fotovoltaicos son una de las tecnologías más prometedoras para la mitigación del cambio climático. Sin embargo, esos esfuerzos requieren una realización extendida y rápida para cumplir la meta de los Acuerdos de Cancún.

## **1.5. Sustentabilidad**

En primera instancia, es indispensable explicar el concepto de sustentabilidad, puesto que existe una confusión con respecto al término ‘sostenibilidad’. En alemán como en inglés existe solamente una palabra que hace referencia a tal concepto: *Nachhaltigkeit*



y *sustainability*, respectivamente. Rivera Hernández *et al.* (2017, 61) mencionaron que, históricamente, en 1992 se introdujo primero el desarrollo sostenible con el enfoque hacia el crecimiento económico de un país. No obstante, la sostenibilidad descartó la preocupación ambiental, por lo que la sustentabilidad tomó una postura “más integral que va mucho más allá de únicamente lo económico” (Rivera Hernández *et al.* 2017, 62). De este modo, lo sustentable empezó a valorar los recursos naturales y la ética y moral cultural, mientras que los modos de producción tradicionales del mercado debían considerar la importancia de la preservación de la naturaleza.

Asimismo, Sánchez Salazar (2016-2017) ahondó en el aspecto ambiental sintetizando su definición de sustentabilidad. De esta manera, lo sustentable respeta la extracción de los recursos naturales por debajo de su capacidad de reproducción, aprecia la utilización del suelo de acuerdo con su aptitud y su capacidad de acogida y considera la generación de contaminantes a una velocidad por debajo de la capacidad de asimilación del medio natural. Estas consideraciones se retomaron de Gómez Orea (2002, 195-203), pero ese autor se refirió a los “criterios ecológicos para la sostenibilidad”. De forma general, Rivera Hernández *et al.* (2017, 63) indicaron que la sustentabilidad es un equilibrio económico-natural, en el cual “se debe integrar el potencial ecológico, el desarrollo tecnológico, la cultura y la sociedad” y cumple las funciones de satisfacer las necesidades humanas y aumentar la calidad de vida. El IPCC (2012, 713) identificó tres pilares fundamentales: la economía, la sociedad y el ambiente. La armonía entre los tres elementos es la solución hacia un desarrollo sustentable.

Por lo mencionado previamente, se implementa el concepto de sustentabilidad, por lo que se utiliza éste a lo largo de todo el proyecto. Es necesario aclarar que se buscó diferenciar la sustentabilidad de la sostenibilidad, que se manejan comúnmente como sinónimos. Pero el propósito de la explicación de ambos términos no es evaluarlos o clasificarlos en el sentido de cuál es mejor. Más bien, el ámbito en el que se desea aplicar el concepto decide cuál se usará en esta investigación.

Por ejemplo, desde 2015 la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) promueve un desarrollo sostenible por medio de 17 objetivos, que incluyen metas para alcanzarlos hasta 2030. Los objetivos 7 y 13 son los que directamente se asocian con esta investigación: ‘Energía asequible y no contaminante’ y ‘Acción por el clima’. Asimismo, importan las metas de ‘Salud y bienestar’ o ‘Vida de ecosistemas terrestres’ como impactos positivos de la propuesta que se detalla más adelante. Con respecto al objetivo 7, se planea un incremento notable de las energías renovables para acelerar la diversificación de las

fuentes energéticas y reducir la contaminación causada por los combustibles fósiles. Pero para alcanzar las metas, es importante impulsar las inversiones en tal sector y facilitar los apoyos económico-políticos para la realización de proyectos de energías renovables.

Con respecto al objetivo 13, el enfoque radica en la mitigación y adaptación al cambio climático. Se les da un papel significativo a las energías renovables para reducir las emisiones de contaminantes, y se destaca la importancia de realizar acciones para contar con “una actividad económica más sostenible y respetuosa con el medio ambiente”. En general, se observa que el aspecto económico tiene prioridad, ya que las consecuencias negativas en la economía por los eventos extremos de la atmósfera es el centro de interés de este objetivo.

Debido a los dos objetivos descritos, se nota que la ONU se orienta hacia el concepto de sostenibilidad, por lo que el desarrollo económico ocupa un puesto destacado. Sin embargo, ello sirve para explicar la validez de utilizar el concepto de sustentabilidad en este proyecto. Por una parte, se tiene el aprovechamiento de un recurso natural inagotable que no emite contaminantes a la atmósfera; por consiguiente, favorece la mitigación del cambio climático. Por otra parte, la implementación de una planta fotovoltaica en las unidades mineras que están en operación beneficia al cuidado del entorno y a la calidad de vida humana.

Pero es necesario aclarar que la operación de un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales no convierte la minería en una actividad sustentable. Más bien, es una medida que contribuye a implementar parcialmente los objetivos de la sustentabilidad en las unidades mineras. Esto es relevante, porque, a pesar de instalar una planta fotovoltaica, la minería sigue siendo una actividad que extrae recursos minerales que no se renuevan a una escala temporal humana y sigue dañando el ambiente durante los procesos mineros. De hecho, Choi y Song (2016b, 9) señalaron que, debido a la contaminación del agua y el suelo por los procesos en las unidades mineras, esos sitios no tienen otro uso después de su vida útil.

En general, la energía solar fotovoltaica genera más energía durante su operación que la que se requiere para la fabricación, instalación y operación de sus componentes en una planta. Así que, Pearce (2002, 669) indicó que cuanto mayor es la radiación solar, tanto más rápido habrá producido un sistema fotovoltaico la cantidad de energía que se invirtió en su fabricación; por eso, una planta fotovoltaica representa una tecnología de energía sustentable. Esto es un asunto muy importante, porque la generación de energía

a partir de los energéticos fósiles causa impactos negativos en el ambiente y la salud humana, y en el futuro aumentará el consumo de energía en forma de electricidad debido al crecimiento de la población mundial; pero se deberá primordialmente al crecimiento de la industria, en particular la gran industria pesada transnacional por el efecto de la globalización económica. Por lo tanto, es necesario lograr una participación mayor de las energías renovables para satisfacer la demanda energética de manera sustentable y poco contaminante (Sen 2004, 373, 380).

Asimismo, el consumo del agua es un factor significativo para la sustentabilidad. De este modo, los sistemas fotovoltaicos necesitan el recurso hídrico para su fabricación, pero durante la operación, el consumo es mínimo. Solamente la energía eólica requiere menos consumo de agua a lo largo de todas las etapas hasta producir energía (IEA 2015, 17). Una consecuencia de esto puede ser la preservación de los acuíferos, con lo que las plantas fotovoltaicas contribuirían a un desarrollo sustentable dentro de la actividad minera, a diferencia de los energéticos fósiles. Aunado a esto, las tecnologías de bajo o ausente consumo de carbón aportan a la descarbonización del sector industrial (IPCC 2014, 100), lo que puede reducir el CO<sub>2</sub> en la atmósfera y, por consiguiente, disminuir el potencial de calentamiento de este gas, como mejorar la calidad del aire. Sin embargo, el aumento constante y grave de las emisiones del CO<sub>2</sub>, en combinación con la deforestación, provocan que las tasas de emisión excedan notablemente a las tasas de eliminación natural (IPCC 2014, 169), por lo que no se cumple con 1 de los 3 principios de la sustentabilidad que sintetizaban Gómez Orea (2002, 195-203) y Sánchez Salazar (2016-2017).

Finalmente, para que las plantas fotovoltaicas sean una tecnología sustentable, es necesario resguardar los bosques y las praderas por su importancia para absorber el CO<sub>2</sub> como servicio ambiental (IPCC 2014, 174), por lo que la toma de decisiones con respecto a la localización de esos sistemas en donde causen el menor impacto a los ecosistemas es fundamental.

## **1.6. Antecedentes de investigación**

Desde una perspectiva de la ingeniería civil mecánica, Arroyo Sáez (2017) hizo un estudio sobre la factibilidad de un sistema fotovoltaico flotante en depósitos de jales en el norte de Chile, donde la radiación solar es mayor que en el centro o el sur. Existe un

paralelismo con México, porque al igual que Chile, es un país con una larga tradición minera cuyos recursos minerales se han orientado al abastecimiento de mercados externos. No obstante, en el país sudamericano los recursos minerales son explotados por empresas estatales. Además, en este país la energía solar fotovoltaica tuvo una participación en la generación de la energía nacional un poco mayor de 7 % (Arroyo Sáez 2017, 4) y, por ende, dicha participación es mucho más significativa que en México. El autor antes mencionado propuso la colocación de plantas fotovoltaicas flotantes en tres depósitos de jales, en los cuales se arreglaron los paneles solares cubriendo una superficie de 10 000 a 12 000 m<sup>2</sup> de éstos. El acomodo se efectuó con el apoyo de las imágenes de satélite de acuerdo con la menor distancia a la red eléctrica y la disponibilidad del agua, porque en un depósito de jales el agua cubrió solamente una menor parte del área total. En el siguiente paso, se realizaron cálculos para estimar la energía producida por plantas con módulos fotovoltaicos sin inclinación, con inclinación y con seguimiento de la luz solar en cada 1 de los 3 depósitos de jales. En el caso del lugar que más radiación solar recibe de entre los tres sitios seleccionados, tendría una producción energética de 3627, 2327 y 2150 megavatio-hora (MWh) al año mediante módulos con seguimiento de la luz solar, módulos inclinados y módulos horizontales, respectivamente.

Song y Choi (2016), que son ingenieros de recursos energéticos, investigaron sobre el potencial de una planta fotovoltaica flotante en una unidad minera donde se extrae caliza para fabricar cemento. Existen tres tajos a cielo abierto, aunque uno se cerró, por lo que los autores plantearon inundar éste. El sistema fotovoltaico se diseñó con paneles solares inclinados fijos y con una capacidad instalada de 1 MW. A partir de un estudio de la insolación, identificaron la parte que más horas de radiación solar recibiría para determinar la posición de la planta fotovoltaica. Para la producción de energía se tomaron en cuenta cinco diferentes ángulos de inclinación de los paneles solares con el resultado de que el ángulo de 40 ° posibilitaría la generación de unos 972 MWh al año. Al final, los autores compararon los impactos ambientales y económicos eventuales si se instalara una planta fotovoltaica flotante o se reforestara el área seleccionada. Mientras que el costo inicial de la reforestación sería casi la mitad que el sistema fotovoltaico, éste lograría una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero dos veces mayor que la plantación de árboles. Sin embargo, si se comparan los dos indicadores considerando la reducción en la cantidad de contaminantes por el costo del proyecto, en teoría, la instalación de una planta fotovoltaica flotante saldría más económica que la reforestación. Cabe mencionar

que esa investigación se realizó en un espacio geográfico diferente al de este proyecto, por lo que los resultados no podrían ser aplicables y se requeriría una estimación adaptada.

La siguiente literatura revisada hace referencia al aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en las unidades mineras, sin la especificación de un sistema flotante. Momayez *et al.* (2009), que publicaron un estudio con la perspectiva de la ingeniería geológica, de las ciencias atmosféricas y de la física, afirmaron un consumo alto de energía en las unidades mineras, y el ahorro de costos por evitar la adquisición de energéticos no renovables posibilitaría una mayor competitividad de las empresas mineras. Por eso, los investigadores propusieron la instalación de una planta fotovoltaica en un depósito de jales. Destacaron las ventajas del sitio, porque normalmente la conexión a la red eléctrica está establecida y el terreno, que ya pertenece a la empresa, no tiene otro uso. Después del cierre de la unidad minera, la electricidad producida podría ser utilizada para el consumo de una comunidad aledaña. Los autores enfatizaron también los costos de tal construcción, pero por el año de publicación los precios no son actuales.

Choi y Song (2016a) dieron una visión general sobre la construcción de plantas fotovoltaicas y eólicas en unidades mineras operantes o abandonadas en el mundo. Con respecto a la energía solar fotovoltaica, los autores presentaron doce casos, seis en minas que están en operación y otras seis que cerraron. En un periodo de nueve meses, la unidad minera *Goldstrike* en Nevada, Estados Unidos de América, construyó un sistema fotovoltaico con una superficie de 3.24 ha y una capacidad instalada de 1 MW para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción del oro y accionar bajo el concepto de la sustentabilidad. También, la mina de cobre *Chuquicamata* en Chile posee una planta fotovoltaica de 1 MW, mientras que el área que ocupa es de 6.25 ha. Su diseño incluye 4080 paneles solares con seguimiento de la luz solar, lo que posibilita la producción de 2.69 gigavatio-hora (GWh) de electricidad cada año. En Australia, existen dos proyectos en las minas *Weipa* (6.7 MW) y *DeGrussa* (10.6 MW). En la unidad minera *Weipa* donde se explota la bauxita, se instalaron 18 000 módulos de capa delgada generando 2.62 GWh cada año, que sustituye el 20 % (600 000 litros) de la demanda de electricidad mediante los generadores de diésel. En cambio, la mina *DeGrussa* procesó 34 080 paneles solares que reducen las emisiones en alrededor de 12 000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Para aumentar el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, la empresa, que extrae cobre y oro, incorporó una batería con el potencial de almacenar 6 MW. La mina de cromo *Thaba* en Sudáfrica tiene un sistema fotovoltaico con una capacidad instalada

de 1 MW mediante 4170 paneles de silicio policristalino. Se espera de esa obra la generación eléctrica de 1.8 GWh al año. Por último, la mina de oro *Rosebel* implementó una planta fotovoltaica de 5 MW. Aunque no se proporcionan datos específicos, los autores afirmaron que la empresa minera pudo bajar notablemente sus costos de energía. Con respecto a las minas abandonadas, los autores mencionaron seis ejemplos también. En Nuevo México en los Estados Unidos de América, la mina cerrada de molibdeno *Chevron Questa* dio lugar a una central térmica solar sobre un área de 8.1 ha y una capacidad instalada de 1 MW. En cambio, la mina de carbón *Meuro* en Alemania permitió la construcción de un parque solar fotovoltaico de 166 MW cubriendo una superficie de 200 ha. En Canadá, la unidad minera *Sullivan*, que produjo plomo y zinc, instaló una planta fotovoltaica de 4000 paneles con seguimiento de la luz solar y una capacidad de 2 MW. Finalmente, los autores coreanos describieron tres casos de su país, que se clasifican como de escala pequeña y mediana, porque tienen la capacidad instalada de 1, 80 y 85 kW. Choi y Song (2016a) destacaron que la implementación de una planta fotovoltaica para una empresa minera tiene las ventajas de reducir su impacto ambiental y su dependencia de los precios altos de hidrocarburos, sobre todo en lugares remotos sin acceso a la red eléctrica.

En otra publicación de esos dos autores (Choi y Song 2016b), éstos se concentraron en la propuesta de un sistema fotovoltaico de 3 MW con un área de 4.4 ha en el depósito de jales de una mina abandonada en Corea del Sur. Esta mina extraía tungsteno, pero cerró en 1992. Se describieron los pasos relevantes para encontrar la mejor ubicación de la planta fotovoltaica y su generación eléctrica. De este modo, se estimó la producción de 3.51 GWh al año. Esa investigación fue interesante, porque los autores afirmaron que solamente el 10 % de todas las unidades mineras en Corea del Sur están operando, y que la mayoría de las abandonadas no tenían proyectos para su utilización después del cierre (Choi y Song 2016b, 9).

Los ingenieros Nasirov y Agostini (2018) también mencionaron las plantas fotovoltaicas que se instalaron en unidades mineras en todo el mundo. Debido a que la publicación es más reciente, se agregaron más proyectos, por ejemplo, Chile y Tanzania. La superficie ocupada por los sistemas fotovoltaicos osciló entre 2 y 45 ha. Aparte de explicar la situación referente a la energía, los autores aludieron a los factores que impulsan el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en la minería, pero también

hicieron constar los obstáculos. Los resultados se obtuvieron mediante encuestas con expertos mineros.

A continuación, se ahonda en las publicaciones sobre las plantas fotovoltaicas flotantes de manera general, sin precisar a la minería como sector para su instalación. Sahu, Yadav y Sudhakar (2018) realizaron un trabajo que constituye una introducción sobre esta innovación tecnológica. Aparte de sus componentes, ventajas y desventajas, enlistaron proyectos existentes en todo el mundo, aunque los ejemplos con mayor capacidad instalada radicaban entre 1.2 y 50 MW en Australia, Japón e India. Liu *et al.* (2017) se concentraron en realzar las ventajas de las plantas fotovoltaicas flotantes frente a las terrestres. De esta manera, realizaron los cálculos para comprobar la mayor eficiencia eléctrica debido a la mitigación del efecto de la temperatura ambiental.

Pimentel da Silva y Castelo Branco (2018) mostraron una comparación meticulosa entre las dos tecnologías. Por ejemplo, identificaron los impactos que cada obra tendría en la flora y fauna, el suelo y el sitio en general, el empleo, el ruido, la generación de basura, el consumo del agua, el paisaje visual, la energía, la contaminación y la sustentabilidad. El resultado fue que el sistema flotante puede tener más beneficios si se instalara en un cuerpo de agua artificial para no perjudicar las especies vegetales y animales.

Igualmente, desde una perspectiva de la ingeniería, Barbuscia (2017) se enfocó sobre todo en la parte económica de una planta fotovoltaica flotante. Por consiguiente, se explicaron los costos iniciales y de capital y los que se necesitan para la operación de tal proyecto. Asimismo, la autora aludió al funcionamiento y a la eficiencia eléctrica, pero los efectos en el ambiente se descartaron.

Rosa Clot, Tina y Nizetic (2017) realizaron un estudio sobre el beneficio de plantas fotovoltaicas flotantes en cuatro cuencas de aguas residuales en Australia. Aunque también recalcaron la mayor eficiencia energética (hasta un 10 %) por el efecto refrescante del agua, el centro de interés era el análisis sobre la reducción de la evaporación del agua en el país, en el cual predominan los climas secos, por lo que la escasez del agua es un problema recurrente.

Ferrer Gisbert *et al.* (2013) experimentaron con un sistema fotovoltaico flotante en una reserva de agua en el este de España. La construcción cubrió solamente el 7 % del cuerpo del agua, pero de valor informativo es la composición de los costos. En éstos, se puede constatar que la estructura flotante contribuyó en un 25 % en el gasto total de tal

sistema. El 50 % se estimó para la fabricación de los paneles solares. Los autores concluyeron que la instalación de una planta fotovoltaica flotante en un cuerpo de agua es factible y viable; además, se conserva suelo fértil para otros usos.

Con base en lo anterior, puede decirse que la investigación de Arroyo Sáez (2017) es la que más se acerca a los objetivos de este proyecto por la coincidencia de los conceptos fundamentales del mismo. En general, la literatura revisada reveló que el tema de investigación es el diseño de proyectos desde la ingeniería, por lo que el desarrollo de un proyecto a partir de un análisis desde el punto de vista geográfico enfatiza el enfoque espacial del vínculo de los componentes naturales y socioeconómicos relevantes. Cabe mencionar que se localizaron varios artículos de investigación con un enfoque similar, pero cuya adquisición implicaba un costo, por lo que no se incluyeron en este estudio.

## **1.7. Metodología**

La metodología es el estudio de los métodos, que “representa la manera de organizar el proceso de la investigación, de controlar sus resultados y de presentar posibles soluciones a un problema que conlleva la toma de decisiones” (Fernández Guerrero 2004, 9). Los métodos son el procedimiento mental y operativo para lograr los objetivos planteados y su elección se relaciona con el diseño de la investigación. Este proyecto comprende una investigación exploratoria la cual, según Fernández Guerrero (2004, 8) trata de aclarar y desarrollar el tema seleccionado para dar una visión general de su situación actual, así como llevar a cabo una interpretación y, posteriormente, aportar ideas de forma tentativa e insinuante para la toma de decisiones.

La investigación se realizó con el empleo de métodos cuantitativos y cualitativos. En cuanto a los métodos cuantitativos, se elaboraron y trabajaron bases de datos con la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Por una parte, los ‘Principales resultados por localidad (ITER) del Censo de Población y Vivienda 2010’ aportaron los datos a nivel municipal para evaluar el inventario de diversas variables e indicadores de la sociedad del estado de Zacatecas. Por otra parte, los ‘Censos Económicos 2014’ indicaron la posición de esta entidad federativa con respecto a las demás según su poder económico, así como la importancia económica de cada municipio en Zacatecas. En detalle, los registros demostraron la participación de la minería en la producción bruta total a nivel estatal y qué sector económico predominó en cuanto al



personal ocupado y en la producción bruta total en los municipios, respectivamente.

Aunado a esto, se profundizó más en el tema de la minería en el estado de Zacatecas y, posteriormente, se representó la distribución espacial de las unidades mineras. En general, la cartografía se aplicó como una herramienta útil para explicitar las semejanzas y diferencias en cuanto a las características de los espacios de interés.

La aplicación del análisis FODA es una medida valiosa, porque posibilita un estudio completo de los factores que influyen en el éxito de una estrategia que una empresa desea implementar.

En el análisis de los resultados de la aplicación de los métodos cualitativos se empleó la labor cartográfica, que se realizó por medio del software *QGIS 3.4.15*. De este modo, la representación de la producción energética de una planta fotovoltaica en un mapa se logró con la recopilación de datos estimados por medio de páginas web, que ofrecen ese servicio gratuito. Con la indicación del sitio y las propiedades del sistema fotovoltaico, por ejemplo, la inclinación de los paneles solares y la potencia nominal, la *PVWatts® Calculator* (Laboratorio Nacional de Energía Renovable, NREL por sus siglas en inglés), el *Global Solar Atlas* (Banco Mundial 2019a) y el *Photovoltaic Geographical Information System* (Comisión Europea 2019a) funcionan como herramientas para estimar la energía solar fotovoltaica que se generaría hipotéticamente.

También, existen softwares como el *System Advisor Model* (NREL) o el *RETScreen Expert* (Gobierno de Canadá) para descargar, pero sus funcionamientos son tan detallados y precisos que posibilitan una evaluación exhaustiva que se descartaron para esta investigación; sobre todo su enfoque en el análisis de la factibilidad con respecto a los costos fue el criterio no emplear los softwares de NREL ni del Gobierno de Canadá. Por ende, se hizo uso de las tres herramientas en línea, que eran suficientes para dar una visión general del potencial de las plantas fotovoltaicas en las unidades mineras estudiadas.

Además, se realizó un trabajo de campo para recopilar información cualitativa en forma de encuestas con las autoridades correspondientes. Previamente, se diseñó la encuesta con preguntas sobre las características de los depósitos de jales, el consumo de energía y la postura hacia temas de energías renovables y sustentabilidad en general. Algunas de las aportaciones se pudieron utilizar para precisar los resultados.

## **Capítulo 2**

### **Importancia de los conceptos clave para el caso de México**

Esta sección retoma los conceptos principales de la investigación presente y describe el estado actual de éstos en México. La importancia de este contexto general radica en fomentar las energías renovables, la mitigación del cambio climático y el desarrollo sustentable en los ámbitos de la generación energética y la actividad minera. De este modo, se explican los diferentes tipos de recursos naturales, porque éstos son la base para la producción de energía. En especial, se concentra en la energía solar fotovoltaica en México; la comparación con otros países sirve para relativizar e interpretar la información obtenida. También, se ahonda en la minería y su vínculo con los gases de efecto invernadero en este país. La referencia al estado de Zacatecas muestra la significancia de esta entidad federativa para el proyecto presente y posibilita la conexión con el siguiente capítulo.

#### **2.1. Producción energética**

A partir de los recursos naturales se produce energía para diferentes usos: la combustión, la generación de electricidad, el bombeo, el calentamiento de agua, etcétera. Los recursos naturales no renovables son aquéllos “que se extraen de los depósitos geológicos que se formaron a partir de biomasa” y no se reproducen en la naturaleza a la escala temporal humana. Entre ellos se encuentran los hidrocarburos (petróleo y gas natural) y el carbón mineral, que son energéticos fósiles junto con el uranio. Este mineral no es producto de la biomasa y sirve de base para la energía nuclear. En cambio, los recursos renovables son los que potencialmente se pueden reproducir a escala temporal humana, no obstante, su explotación desmesurada y excesiva puede interferir en los procesos naturales y reducir su presencia y/o calidad, de modo que puedan comprometer su renovación; por ejemplo, el agua subterránea y superficial, la vegetación, la fauna o el suelo se conciben en esta categoría. Los tipos energéticos a partir de los recursos renovables son la energía hidroeléctrica, la biomasa, la leña y el bagazo de caña. Por último, los recursos inagotables existen de forma permanente, sin importar el ritmo de

aprovechamiento de ellos. Así que, la radiación solar, el viento, el oleaje, las mareas o el calor del interior de la Tierra son insumos para generar energía útil: solar fotovoltaica y térmica, eólica, undimotriz, mareomotriz y geotérmica, respectivamente. No obstante, es necesario aclarar que se requiere cierto avance y progreso tecnológico para beneficiarse de los recursos naturales, sobre todo de los inagotables; cuyo auge es más reciente debido a las innovaciones tecnológicas de los últimos años, la contaminación ambiental por los energéticos fósiles, así como la conciencia ecológica de las sociedades.

Aunque sus reservas se agotan más rápidamente, los recursos no renovables se explotan con mayor intensidad; por eso, el 86 % de la producción mundial de energía en 2016 se conformó por los energéticos fósiles. El IPCC (2012, 168) aclaró que las acciones antrópicas en el sector energético, la deforestación, la quema de combustibles fósiles y el cambio del uso del suelo son factores que aceleran el calentamiento global debido a la emisión excesiva de gases del efecto invernadero.

Para la reducción de los gases de efecto invernadero en la atmósfera se desarrollan diversas acciones y estrategias. El IPCC (2012, 164) señala la importancia de las energías renovables, puesto que juegan un papel en suministrar servicios de energía de una manera sustentable y en mitigar el cambio climático. Por una parte, su carácter inagotable por no consumir un recurso natural hasta su extinción explica su aportación hacia un desarrollo sustentable. Por otra parte, durante su proceso de producción se generan menores o nulas emisiones de contaminantes de manera que este tipo de energías contribuye a conservar la calidad del agua, aire y suelo, así como la calidad de vida vegetal, animal y humana. De acuerdo con el IPCC (2012, 178), la energía renovable es cualquier forma de energía proveniente de las fuentes solar, geofísica o biológica, que se reponen mediante procesos naturales a un ritmo que es igual o que excede su ritmo de uso. Cabe destacar la existencia de una dicotomía, donde hay energía renovable y no renovable (fósil); por lo tanto, es importante esta definición, ya que algunos recursos renovables son inagotables, pero otros no lo son, y su reposición depende de su ritmo de explotación.

A pesar del dominio de los energéticos fósiles, su distribución y abastecimiento resulta difícil en zonas rurales por la poca accesibilidad, la gran dispersión de los asentamientos humanos y/o la deficiencia estructural en el suministro de la energía eléctrica por la configuración de la red de transmisión eléctrica. Entonces, esas zonas pueden satisfacer su necesidad de energía con energéticos alternativos en lugar de carecer de ella o adquirir combustibles fósiles. Más allá, el transporte de éstos significa otro factor

para la emisión de contaminantes, porque se realiza principalmente por medio de camiones de carga debido a la falta de otras alternativas de transporte que manejen mayores volúmenes a menor costo como el ferrocarril.

El empleo de la energía solar, que se subdivide en la fotovoltaica y la térmica, se consolidó en muchos países y logró el prestigio de ser una de las tecnologías de energía renovable con mayor crecimiento y con un papel más importante en la producción global de energía (IPCC 2012, 340). La IEA (2019b, 7) da una visión general sobre la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos en el mundo. El cuadro 2.1 muestra que China dominó el mercado hasta el 2018, ya sea con la instalación nueva o acumulada de módulos fotovoltaicos. Asimismo, revela que sobre todo los países desarrollados, que cuentan con un PIB más elevado, tienen mayor capacidad instalada de generación, lo que se debe al capital y a la tecnología disponible como factores de producción más decisivos.

En cambio, la potencialidad del propio planeta, como fuente de los recursos naturales que permiten generar la energía que sirve como base para impulsar el crecimiento económico de un territorio, es menos significativo, de acuerdo con lo que señala dicho cuadro, porque los países ubicados en las zonas tropicales reciben la radiación solar con una mayor intensidad por la incidencia más perpendicular de ella sobre la superficie terrestre, que en las latitudes hasta los 55°N (en el caso de Alemania y Reino Unido). La única excepción en esta lista es India, que se encuentra mayormente entre las latitudes de 10°N a 30°N y es considerada como un país en vías de desarrollo o emergente con una industrialización creciente.

En cuanto a la capacidad instalada en el año 2018, México se encontró en el séptimo lugar, por lo que se puede confirmar la implementación progresiva de la energía solar fotovoltaica. A nivel mundial, la fotovoltaica satisfizo la demanda de electricidad en un 2.6 % en 2018, mientras las fósiles y la energía nuclear dominaron en un 72 % (IEA 2019b, 15). Asimismo, la hidroeléctrica (17 %) y la eólica (6 %) superaron a la energía solar fotovoltaica.

Cuadro 2.1. Generación eléctrica de origen fotovoltaico en los diez países que concentran la mayor capacidad instalada y capacidad acumulada (gigavatio, GW), 2018.

Lugar	País	Capacidad instalada en 2018 (GW)	País	Capacidad instalada acumulada (GW)
1	China	45.0	China	176.1
2	India	10.8	Estados Unidos de América	62.2
3	Estados Unidos de América	10.6	Japón	56.0
4	Japón	6.5	Alemania	45.4
5	Australia	3.8	India	32.9
6	Alemania	3.0	Italia	20.1
7	México	2.7	Reino Unido	13.0
8	Corea del Sur	2.0	Australia	11.3
9	Turquía	1.6	Francia	9.0
10	Países Bajos	1.3	Corea del Sur	7.9

Fuente: Elaboración propia con base en IEA (2019b).

La importancia de la energía solar de origen fotovoltaico y, por ende, su mayor integración, puede incrementarse en los siguientes años, porque se va a requerir de la generación de más energía. La necesidad de ésta se manifiesta en el hecho de que su demanda aumenta con el crecimiento poblacional y el desarrollo económico. En el caso de México, la SENER (2018, 31) informó que el consumo nacional de energía se incrementó en un 1.2 % con respecto al año anterior. La relación entre el consumo y la producción interna de energía revela una dependencia energética, debido a que México no pudo cubrir su demanda energética en el periodo de 2015 a 2017, por lo que tuvo que cubrir su déficit con importaciones.

Con el fin de transitar hacia una independencia energética se deberían fomentar las energías renovables a un ritmo mayor. De esta manera, el Programa de Sistemas Energéticos Fotovoltaicos (PVPS por sus siglas en inglés) busca impulsar los esfuerzos internacionales de colaboración que facilitan el rol de la energía solar fotovoltaica como un pilar en la transición hacia sistemas energéticos sustentables (IEA 2019a, 8). En efecto, México es uno de los 32 miembros en ese programa, pero destaca por ser el único miembro que aún no ha designado a un encargado representativo ni a la organización participante en ese programa.

De acuerdo con la SENER (2018, 23), los tipos de energéticos que produjeron la mayor proporción de energía primaria en México en 2017 siguen siendo los de origen fósil (cuadro 2.2). Entre ellos, destacaron los hidrocarburos con el 84.5 % de la producción total, de los cuales el petróleo domina con el 62 % a todos los demás, seguido por el gas

natural y condensados. En cambio, las energías renovables sumaron apenas el 9.5 %, que es menos de la décima parte de la producción total nacional. Aunque se registra un aumento en el aprovechamiento de la radiación solar en los últimos años, solamente el 0.2 % de la energía primaria producida en 2017 provino de la energía solar. En efecto, entre los diferentes tipos de energías renovables, la energía solar tuvo la menor aportación a pesar de su gran potencial.

En relación con la producción mundial de energía en 2016, la participación de las energías renovables fue de 14 %, por lo que México se encuentra por debajo del promedio mundial en la producción de este tipo de energía (SENER 2018, 15).

Cuadro 2.2. Producción de energía por tipo de energético en México y el mundo.

Producción de energía por tipo de energético	México (2017, %)	Mundo (2016, %)
Petróleo	62.0	32.5
Gas natural y condensados	22.6	22.0
Carbón y sus derivados	4.4	26.6
Renovables	9.5	14.0
Nuclear	1.6	4.9
Total	100	100

Fuente: Elaboración propia con base en SENER (2018). La sumatoria puede diferir del 100 % por el redondeo.

Más aún, hay países que incorporaron los energéticos limpios a mayor escala y de manera más impresionante (IEA 2019a, 51, 68, 89, 95-96, 103). Por ejemplo, como se aprecia en el cuadro 2.3, en 2018, Alemania y Chile satisficieron su consumo energético mediante la energía fotovoltaica en un 8 % y 7 %, respectivamente. Marruecos planea incrementarlo al 14 % para el 2020, mientras España (con 3 %) y Portugal (con 1.7 % de su consumo total) también superaron a México, aunque en menor magnitud. Las energías renovables en su conjunto desempeñan un papel mucho más significativo en todos los países señalados -entre los que se encuentran algunos desarrollados e industrializados, un latinoamericano y un africano- que en México. La Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA por sus siglas en inglés, 2015, 47-48) prevé que para 2030, en el caso de México, la participación de la energía fotovoltaica represente el 13 % de las energías renovables, mientras que éstas se incrementen hasta alcanzar el 21 % del consumo energético total.

Cuadro 2.3. Participación de las energías renovables en el consumo energético total en algunos países seleccionados, 2018.

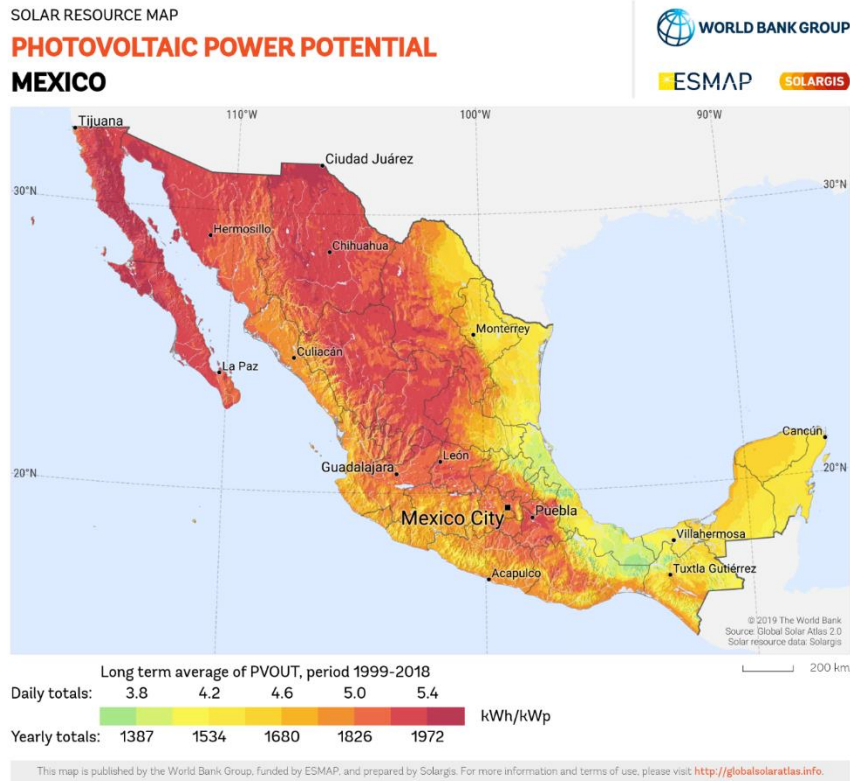
Tipo de consumo energético	Alemania (%)	Chile (%)	España (%)	Marruecos (%)	Portugal (%)
Consumo energético cubierto por energías renovables	38.0	20.0	37.4	39.0	51.7
Consumo energético cubierto por energía fotovoltaica	8.0	7.0	3.0	14.0	1.7

Fuente: Elaboración propia con base en IEA (2019a).

La Asociación Mexicana de Energía Solar (ASOLMEX 2018) tiene el registro de todas las centrales solares en el país. Así, en once entidades federativas (Coahuila, Aguascalientes, Guanajuato, Sonora, Chihuahua, Durango, Baja California Sur, México, Jalisco, Baja California y Querétaro) se encuentran 31 instalaciones, aunque es necesario aclarar que no se especifica si son fotovoltaicas y/o térmicas; su capacidad instalada es de 1.76 GW que equivalen a 1760 MW. Por su parte, la SENER (2016, 58) registró nueve centrales fotovoltaicas en 2015 con una capacidad instalada de 56.3 MW. Debido al auge reciente de la energía fotovoltaica es posible que la capacidad instalada se haya incrementado, sobre todo porque la IEA (2019b, 7) informó que se instalaron plantas fotovoltaicas con una capacidad total de 2.7 GW en 2018. Pero esto significa una inconsistencia de los datos, en la que se puede constatar que la ASOLMEX señala una capacidad instalada total menor a la que indicó la IEA solo para el 2018. Aun así, las dos instituciones mexicanas revelaron que en el estado de Zacatecas no se han instalado plantas de energía solar fotovoltaica.

Los mapas proporcionados por el Banco Mundial (2019b), que se basan en los datos de 20 años registrados, muestran la radiación global horizontal (figura 2.1) y el potencial de la energía solar fotovoltaica (figura 2.2) en México. Se aprecia que el estado de Zacatecas recibe una radiación solar considerable. Debido a que se busca diversificar las fuentes de energía, se debería invertir en la instalación de sistemas fotovoltaicos grandes debido a la cantidad de radiación solar y el potencial notable. Además, hay un auge en el desarrollo de centrales solares fotovoltaicas por ser una energía limpia y sustentable.

Figura 2.1. Radiación global horizontal en México.



Fuente: Tomado de Banco Mundial (2019b).

Figura 2.2. Potencial de la energía solar fotovoltaica en México.



Fuente: Tomado de Banco Mundial (2019b).



## 2.2. Actividad minera

Después de haber descrito la situación de la producción de energía, es importante ahondar en el consumo final de ésta. Para el 2017, la SENER (2018, 33) mostró que los sectores del transporte (con 42.9 %) e industrial (con 34.1 %) eran a los que más se dirigió la energía generada en México. Mientras que la energía solar contribuyó con el 0.9 % y el 0.5 % en los usos residencial y comercial, respectivamente, el sector industrial recibió solamente el 0.03 % de energía de la fuente solar, en tanto que en el transporte estaba ausente. Por lo tanto, se puede constatar que su participación en la energía consumida total era muy baja, pero en el consumo industrial todavía era más insignificante.

En el sector industrial, la minería metálica y no metálica, excepto petróleo y gas, consumió el 3.8 % del total de la energía por lo cual ocupa el cuarto lugar. Los energéticos de mayor consumo en este sector fueron la electricidad (60.5 %), los petrolíferos (22.9 %) y el gas seco (16.6 %); de hecho, entre las principales ramas del sector industrial, solamente la fabricación de fertilizantes consumió mayor volumen de electricidad que la minería (SENER 2018, 41). Nasirov y Agostini (2018, 195) señalaron para Chile que la industria y la minería son los dos mayores sectores económicos en consumir energía y los energéticos utilizados en las unidades mineras estaban compuestos sobre todo de electricidad (35 %), diésel (26 %) y biomasa (20 %). Además, se aclaró que los costos iniciales para implementar los sistemas fotovoltaicos son más altos que para los energéticos fósiles; sin embargo, el suministro de combustibles como el diésel a regiones remotas es económicamente poco redituable e interfiere en la productividad (Nasirov y Agostini 2018, 197).

La participación de la minería en el consumo energético es pequeña en México (3.8 % del sector industrial), pero una revisión de su emisión de gases de efecto invernadero arroja resultados importantes (cuadro 2.4). De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC 2015), el 4.1 % de todas las emisiones netas en 2015 fueron producidas por la minería (con excepción de combustibles), la cantería, la minería carbonífera y el manejo del carbón. En 1990, su participación en la generación de gases de efecto invernadero era de 3.3 %, por lo que en el lapso de 25 años se registra un aumento, a pesar del surgimiento de una consciencia con respecto al cambio climático y su mitigación. Más aún, entre 1990 y 2015 las emisiones netas de gases de efecto invernadero incrementaron en un 121 % en la minería y cantería,

así como en un 140 % en la minería carbonífera, mientras que el conjunto de todas las actividades con emisión observó un aumento de 86 %.

En cuanto a los tres gases principales, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) se constata un crecimiento muy superior en la minería con respecto al resto de las actividades para ese periodo. De hecho, se lograron reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> y de N<sub>2</sub>O en el sector industrial de manufacturera y de construcción, por lo que sorprende que el comportamiento de la minería en dichas emisiones se opone a esa tendencia.

Cuadro 2.4. Crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector industrial y la minería de México durante el periodo 1990-2015.

Categoría	Crecimiento de emisiones de 1990 a 2015 (%)			
	Total de gases del efecto invernadero	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Total de emisiones netas	86	113	56	11
Sector industrial de manufacturera y de construcción	25	25	-9	-10
Minería (excepto combustibles) y cantería	121	121	125	111
Minería carbonífera y manejo del carbón	140	0	140	0

Fuente: Elaboración propia con base en INECC (2015).

Por lo tanto, el suministro de electricidad en las unidades mineras es un asunto importante, así como su generación de manera sustentable para reducir las emisiones de contaminantes. En efecto, la CAMIMEX (2012b) promueve un “compromiso ambiental” y la “disminución significativa de emisiones de gases de efecto invernadero” entre sus empresas afiliadas. Asimismo, el uso de energías limpias representa una estrategia para reducir la huella de carbono. Esta consciencia ambiental está en oposición con el hecho de que existe un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a los procesos que hoy requiere la gran minería a cielo abierto: el empleo de grandes volúmenes de explosivos y soluciones ácidas para la lixiviación y cianuración.

Evidentemente, la demanda de la industria y la sociedad consumista provoca la exploración y la explotación acelerada y excesiva de minerales metálicos y no metálicos por la demanda de bienes elaborados. Asimismo, las empresas, por su mentalidad capitalista de maximizar las ganancias y reducir los costos de producción, practican una minería contaminante y poco sustentable. Sin embargo, el Acuerdo de París prevé para 2030, en el caso de México, la reducción de emisiones de gases del efecto invernadero en un 22 % para evitar el aumento de la temperatura promedio en 2 °C (INECC 2018). En detalle, se desglosa el porcentaje de reducción de emisiones para diversos sectores,

aunque es necesario destacar los planes moderados para la industria (5 %) y el petróleo y gas (14 %), porque son actividades que emiten grandes cantidades de contaminantes; el 64 % de todas las emisiones las provocó el consumo de combustibles fósiles. Aunado a esto, los países miembros se pusieron de acuerdo en que la meta fuera lograr una participación de energías limpias en un 35 % y 50 % en 2024 y 2050, respectivamente. Debido a la integración de este compromiso en la legislación, México se obliga a cumplir con esas metas, que consideran la disminución en un 31 % de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de la generación eléctrica; se trata de una meta ambiciosa, pero también positiva por el potencial del recurso solar existente en este país.

Es evidente el daño al ambiente que genera la minería por su emisión de gases de efecto invernadero y la falta de la adopción de estrategias sustentables insuficientes. Una medida factible sería la tecnología de sistemas fotovoltaicos flotantes. La empresa *Ciel et Terre* se especializó en esa tecnología e instaló 180 plantas en 30 países, por lo que se considera líder en este rubro a nivel mundial. En el ámbito de la minería, se realizaron cinco proyectos de tamaño notable en lagos artificiales en las que se depositan los residuos mineros en Alemania, Chile y sobre todo China. Debido al consumo notable de insumos y la ubicación remota, “la energía solar flotante ofrece aquí una solución económica para satisfacer las necesidades energéticas y ayuda a reducir la evaporación del agua, especialmente valiosa en el proceso de explotación minera” (Ciel et Terre 2018).

Para el caso de Zacatecas, el SGM (2018a, 15) señaló que es el segundo estado minero del país y uno de los más importantes en la extracción de metales preciosos. En efecto, el INEGI (2014) indicó que la minería participó con el 40.8 % de la producción bruta total del estado zacatecano. Solamente en los estados de Campeche y Tabasco la actividad minera aportó más, 91.9 % y 63.8 %, respectivamente, aunque es necesario aclarar que esto se debió a la minería petrolera. De forma más específica, se calculó el volumen de producción acumulada de ciertos minerales de acuerdo con los anuarios estadísticos sobre la minería mexicana del SGM (2019) para el periodo de 1988 a 2016. Los resultados demuestran que, durante los 29 años, el estado de Zacatecas fue el primer productor de la plata (42.6 % del volumen total nacional de la producción acumulada en el periodo seleccionado), del plomo (38.8 %) y del zinc (36.1 %), mientras que fue el segundo y cuarto productor del cobre (7.0 %) y del oro (14.2 %), respectivamente.

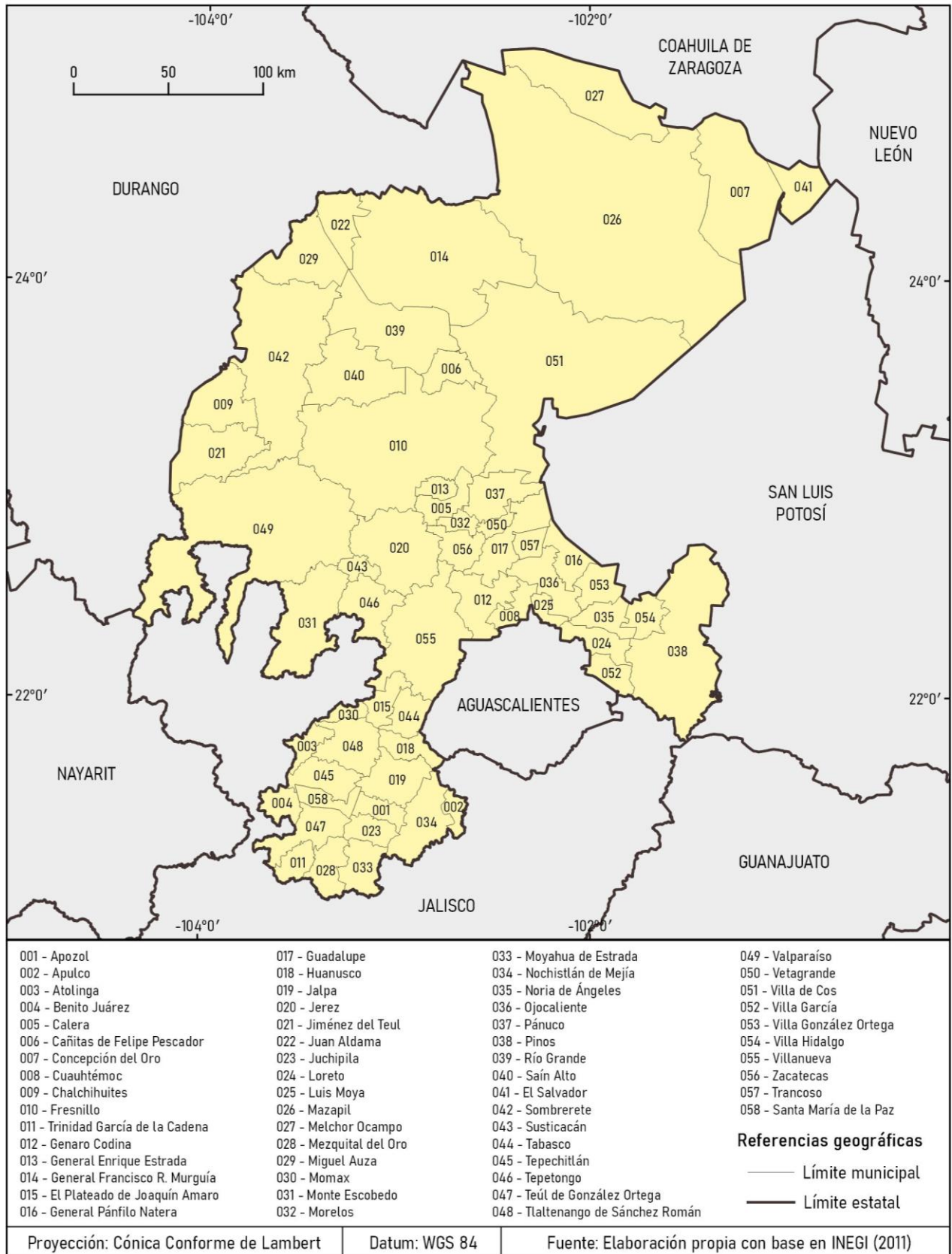
## **Capítulo 3**

### **Contexto físico-geográfico, social y económico del estado de Zacatecas**

El estado de Zacatecas, que se divide en 58 municipios (figura 3.1) y cuya capital lleva el mismo nombre, se ubica en la región centro-norte de la República Mexicana, extendiéndose sobre una longitud de 104°21'14.4"W a 100°44'31.2"W, así como sobre una latitud de 21°2'30.84"N a 25°7'30.72"N, por lo que se encuentra al occidente del hemisferio norte. El estado zacatecano comparte límites con ocho entidades federativas: al norte colinda con Coahuila de Zaragoza, al noreste con Nuevo León, al este con San Luis Potosí, al sureste con Guanajuato, al sur con Aguascalientes, al suroeste con Nayarit, al sur y suroeste con Jalisco y al oeste y noroeste con Durango. La superficie estatal es de 77 684 kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) con lo que ocupa el 4 % de la superficie total del país. De acuerdo con el SGM (2018b, 3), la altitud promedio es de 2100 m sobre el nivel del mar y el clima semiárido se caracteriza por una temperatura media anual de 16 °C, así como lluvias de 510 milímetros (mm) al año.

En los siguientes apartados se describen las condiciones físico-geográficas, sociodemográficas y económicas para dar una visión general de Zacatecas a nivel estatal y municipal. Entre ello, se muestran unos elementos climáticos y el uso del suelo, la situación de la población con respecto a su distribución y calidad de vida, y la importancia económica de los municipios y sus actividades. Todas las características naturales fueron seleccionadas en función de su importancia para el tema de investigación. Posteriormente, se busca interpretar la información diversa y encontrar patrones espaciales.

Figura 3.1. División política municipal del estado de Zacatecas, 2010.



### 3.1. Naturaleza

La consideración del relieve es importante para las plantas fotovoltaicas, porque la orografía causa sombreado en ciertas zonas por sus elevaciones y su orientación hacia el Sol. Por medio de la figura 3.2, se constata que las mayores elevaciones se encuentran en el noreste, aunque las regiones del oeste-centro-sur concentran más montañas. A causa del Altiplano Mexicano y la Sierra Madre Occidental, el estado zacatecano cuenta con mesetas, así como laderas que forman cerros y valles, respectivamente.

Como se mencionó previamente, el estado de Zacatecas está expuesto a un clima semiárido, lo que se puede apreciar en la figura 3.3, en la cual se nota el predominio de ese tipo climático por la franja del este al oeste, cubriendo el centro de la entidad federativa, y unas porciones pequeñas en el noreste, que tiene como consecuencia una homogeneidad de los tipos de clima en la mayoría del territorio zacatecano. El clima árido y muy árido al norte del estado se asocia a la cercanía de los desiertos mexicanos en el Altiplano. Las regiones reducidas que experimentan estados atmosféricos semicálidos y templados se ubican al sur, donde existe una interrelación entre las sierras y las llanuras y, por consiguiente, la vertiente de barlovento de las estribaciones de la Sierra Madre Occidental cuenta con precipitaciones abundantes, mientras que la de sotavento carece de éstas.

Las figuras 3.4 y 3.5 muestran los regímenes calórico y pluvial. Las zonas que más superficie estatal ocupan son las que cuentan con temperaturas medias de 14 a 16 °C y de 16 a 18 °C, salvo el norte, sur y suroeste, donde se observan porciones con temperaturas de 18 hasta 24 °C. Con respecto a las precipitaciones pluviales, se identifica una franja diagonal desde el sureste hacia el noroeste con lluvias anuales de 500 a 600 mm. Al noreste de esa divisoria imaginaria las precipitaciones disminuyen hasta el mínimo estatal de 200 a 300 mm con pequeñas excepciones. En cambio, se constata un aumento constante hacia el suroeste hasta llegar a una cantidad de 1000 a 1200 mm de lluvias al año.

Para evaluar la radiación solar, se representa la insolación anual (figura 3.6). La gran parte de la superficie estatal de Zacatecas recibe de 2600 a 3000 horas de la luz solar al año, lo que equivale de 7.1 a 8.2 horas diarias en promedio. En cambio, en el noreste y sureste del estado se observa una menor cantidad de insolación, que va de 2200 a 2600 horas anuales (de 6 a 7.1 horas diarias de insolación en promedio). Pero la obtención de la información confiable sobre la radiación solar o insolación es difícil. Para trabajar con registros climatológicos, éstos deben tener un periodo de recopilación de al menos 30 años. En el caso de los datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la

Biodiversidad (CONABIO, 2008) son 28 años y las categorías son amplias, con un rango de 400 horas de insolación. Por eso, se elaboró una base con datos secundarios del *Global Solar Atlas* (Banco Mundial 2019a), la cual tiene 209 ubicaciones dentro del territorio zacatecano con su radiación solar (radiación global horizontal, kWh/m<sup>2</sup>, equivalente a las horas de insolación anual) correspondiente. En general, los valores son menores a lo que el mapa anteriormente descrito revela. El estado de Zacatecas cuenta con 2213 horas de insolación al año en promedio. El valor mínimo es de 2045 y el valor máximo es de 2280, por lo que resulta una diferencia de 235 horas; por el contrario, CONABIO (2008) señala una diferencia de 800 horas de insolación anual a causa de los rangos extremos.

En síntesis, el análisis de los componentes del clima es útil. De este modo, la temperatura es importante, ya que su menor magnitud incrementa el rendimiento de los paneles solares. Las mayores cantidades de precipitación implican la mayor presencia de humedad relativa y, por ende, mayor nubosidad en la zona, que, posteriormente, impide la penetración de la radiación solar incidente. En cambio, las lluvias limpian los módulos de forma más sustentable, porque no se necesita acudir a las reservas de aguas subterráneas. De manera general, los tipos de clima que rigen en el estado zacatecano revelan condiciones climáticas favorables para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, puesto que las temperaturas y precipitaciones moderadas indican la ausencia de estados atmosféricos extremos. No obstante, el componente más importante para los sistemas fotovoltaicos es la radiación solar, debido a su mayor intensidad la generación energética aumenta y justifica su adquisición y costo inicial. A pesar de su indispensabilidad, se aprovecha esa tecnología también en latitudes más altas, que se caracterizan por una radiación solar menor que la existente en el estado de Zacatecas. Aun así, es una ventaja para la entidad federativa mexicana contar con una intensidad de insolación considerable.

La preponderancia del clima seco-semiseco y la intensidad considerable de radiación solar fomenta la carencia del agua. De este modo, el estado de Zacatecas experimenta una escasez del agua ya de por sí. Además, pueden ocurrir fenómenos atmosféricos que provocan una mayor falta del recurso hídrico que, posteriormente, tiene impactos en la calidad de vida de los habitantes y en las actividades económicas que emplean el agua como insumo en los procesos. Una sequía es uno de esos eventos que agudizan esa situación, porque la lluvia y el escurrimiento natural son menores al promedio en un periodo dado, y su duración afecta a las actividades humanas (Gómez

Mendoza 2018). En efecto, se observa un peligro por la presencia de sequías (figura 3.7), aunque no sigue estrictamente el patrón de los tipos de clima. De esta manera, el norte en el cual se encuentra la zona más árida muestra un menor peligro por sequías que el sur y suroeste, que cuenta con mayores precipitaciones pluviales. Esto comprueba la afirmación de que las sequías pueden surgir en cualquier zona climática, aunque se asocian principalmente con los climas áridos y semiáridos. De hecho, las regiones que reciben menores cantidades de lluvias están más adaptadas a esa escasez, mientras que la ausencia o la disminución de éstas causa mayores problemas en zonas en las cuales abundan las precipitaciones. Cabe mencionar que el peligro de las sequías se representa a nivel municipal, mientras que los tipos de clima, así como la temperatura y la precipitación no respetan los límites político-administrativos. De este modo, hay una distorsión en la representación de los resultados y una dificultad para sintetizar los indicadores; pero se permite la posibilidad de identificar una tendencia que, en este caso, muestra que los municipios centrales tienen un mayor peligro por presencia de sequías; en esos municipios predomina un clima semiárido con precipitaciones moderadas.

En cambio, el exceso de lluvias y vientos muy fuertes a causa de los ciclones tropicales significan un menor peligro para el estado de Zacatecas (figura 3.8). En general, el peligro es bajo o muy bajo, porque la entidad federativa se ubica en el centro del país, sin litoral y con la protección de cadenas montañosas impidiendo el impacto grave de esos fenómenos hidrometeorológicos del Océano Pacífico. En el norte-noreste y oeste-suroeste hay una probabilidad de incidencia media de tormentas de granizo como fenómeno peligroso (figura 3.9), mientras que en el resto del estado es bajo. Las regiones más amenazadas por la ocurrencia de tormentas de granizo se encuentran en las inmediaciones de la Sierra Volcánica Transversal y la Sierra Madre Occidental. Con respecto a las nevadas (figura 3.10), dos municipios en el centro y noroeste tienen un peligro medio, en los demás municipios es bajo y muy bajo. Las entidades federativas más afectadas por nevadas son Chihuahua y Durango por las temperaturas muy bajas.

Con referencia a la instalación de sistemas fotovoltaicos, las sequías influyen en la probabilidad de disponer de agua en un lugar determinado, que puede causar una falta del recurso hídrico para la limpieza de los módulos solares. En cambio, los ciclones tropicales, las tormentas de granizo y las nevadas significan un impacto directo en el funcionamiento de las plantas fotovoltaicas y, por consiguiente, en su rendimiento y utilidad.



Las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 muestran la distribución de la vegetación y cómo se utiliza el suelo del estado de Zacatecas. En los tres mapas se observa el mismo patrón, en el cual predominan los matorrales en el norte-noreste y en el sur-suroeste los bosques, ambos divididos por una franja diagonal de cultivos agrícolas y pastizales desde el sureste hacia el noroeste. El clima condiciona a la vegetación, por lo que las zonas con mayor cantidad de lluvias permiten el desarrollo de una flora boscosa, mientras que las regiones áridas y semiáridas se caracterizan por la vegetación arbustiva y menos densa. Por eso, se identifica una distribución vegetal coherente con los tipos de clima. Las zonas urbanas y los cuerpos de agua son casi indiscernibles; los terrenos dedicados a la agricultura se dispersan como parches dentro de la matriz de los bosques, fragmentando así el patrón de la vegetación en el sur. Una estimación del área ocupada por tipo de uso del suelo (cuadro 3.1) revela algunos cambios para el periodo de 1997 a 2016:

Cuadro 3.1. Evolución de la superficie ocupada por tipo de uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 1997-2016.

Uso del suelo y vegetación	1997		2005		2016		Balance 1997-2016	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Matorral	31 777.6	42.67	27 194.9	36.51	27 105.8	36.39	-4671.8	-6.27
Agrícola	15 827.3	21.25	18 578.0	24.94	19 715.7	26.47	+3888.5	+5.22
Bosque	12 410.2	16.66	14 579.0	19.57	14 946.8	20.07	+2536.6	+3.41
Pastizal	14 433.7	19.38	13 687.0	18.38	12 070.5	16.21	-2363.2	-3.17
Zona urbana	8.2	0.01	269.0	0.36	432.3	0.58	+424.2	+0.57
Cuerpo de agua	17.0	0.02	145.6	0.20	147.5	0.20	+130.5	+0.18
Sin uso/vegetación	5.7	0.01	26.3	0.04	61.0	0.08	+55.3	+0.07
Total	74 479.7	100	74 479.7	100	74 479.7	100	±0	±0

Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO (2009 y 2017).

Los incrementos más altos se registraron en los cultivos agrícolas y los bosques, 5.2 y 3.4 %, respectivamente. También aumentó la superficie de las zonas urbanas, los cuerpos de agua y los suelos desprovistos, pero hay que aclarar que, a pesar de esta tendencia, su participación en el área total del estado zacatecano es insignificante. El resultado recalca también el carácter rural que tiene el estado de Zacatecas, puesto que la extensión de los asentamientos humanos es muy reducida, que se relaciona con la ausencia de una gran cantidad de ciudades medianas y grandes.

Las pérdidas del 6.3 % de los matorrales y del 3.2 % de los pastizales posibilitaron el incremento de los otros tipos de uso del suelo y vegetación: los campos agrícolas

aumentaron el 5.2 % y los bosques el 3.4 %. Posibles razones para las pérdidas de ambos tipos de cobertura de suelo y, por consiguiente, de una transformación territorial, pueden ser las preferencias en las actividades económicas, porque los bosques suministran la materia prima para la actividad forestal y la agricultura produce mercancía alimenticia; al contrario, los pastizales y los matorrales tienen principalmente un potencial pecuario. La tendencia hacia un crecimiento de la superficie boscosa es positiva, porque ésta suele ser sustituida por la ganancia de terreno con fines agrícolas y ganaderos.

Aun así, los matorrales ocupan el primer lugar con el 36.4 % en 2016. Este tipo de vegetación proporciona buenas condiciones para la instalación de plantas fotovoltaicas, ya que se caracterizan por la vegetación baja y dispersa que carece de ecosistemas altamente densos y desarrollados. A causa de la disminución de los matorrales en su extensión en el estado de Zacatecas, se constata una menor superficie disponible para las plantas fotovoltaicas. La mayor existencia de bosques impide la instalación de esta tecnología; además, la deforestación para posibilitar el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica es una estrategia contradictoria al concepto de sustentabilidad y a la mitigación del cambio climático. La utilización de los depósitos de jales en las unidades mineras para producir electricidad a partir de la radiación solar conservaría los diferentes tipos de vegetación sin intervenir o alimentar en las tendencias crecientes o decrecientes.

Las Áreas Naturales Protegidas (figura 3.14) se ubican en el sur y suroeste, por lo cual el resto del estado es libre de esos espacios. Por lo tanto, cuanto más aumenta la aridez de un lugar, tanta menos importancia ecológica para su preservación existe. Las Áreas Naturales Protegidas son espacios que impiden la instalación de un sistema fotovoltaico. Aunque se busca que su instalación sea en depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas, la cercanía de esas construcciones a las Áreas Naturales Protegidas puede tener impactos en la vida animal específicamente, debido a los reflejos de los rayos de luz solar y a modificaciones probables en el microclima.

En la mayoría de los mapas en torno al medio geográfico del estado de Zacatecas se incluyeron las localidades urbanas con 15 000 habitantes o más para dar una orientación.

Figura 3.2. Altimetría en el estado de Zacatecas, 2013.

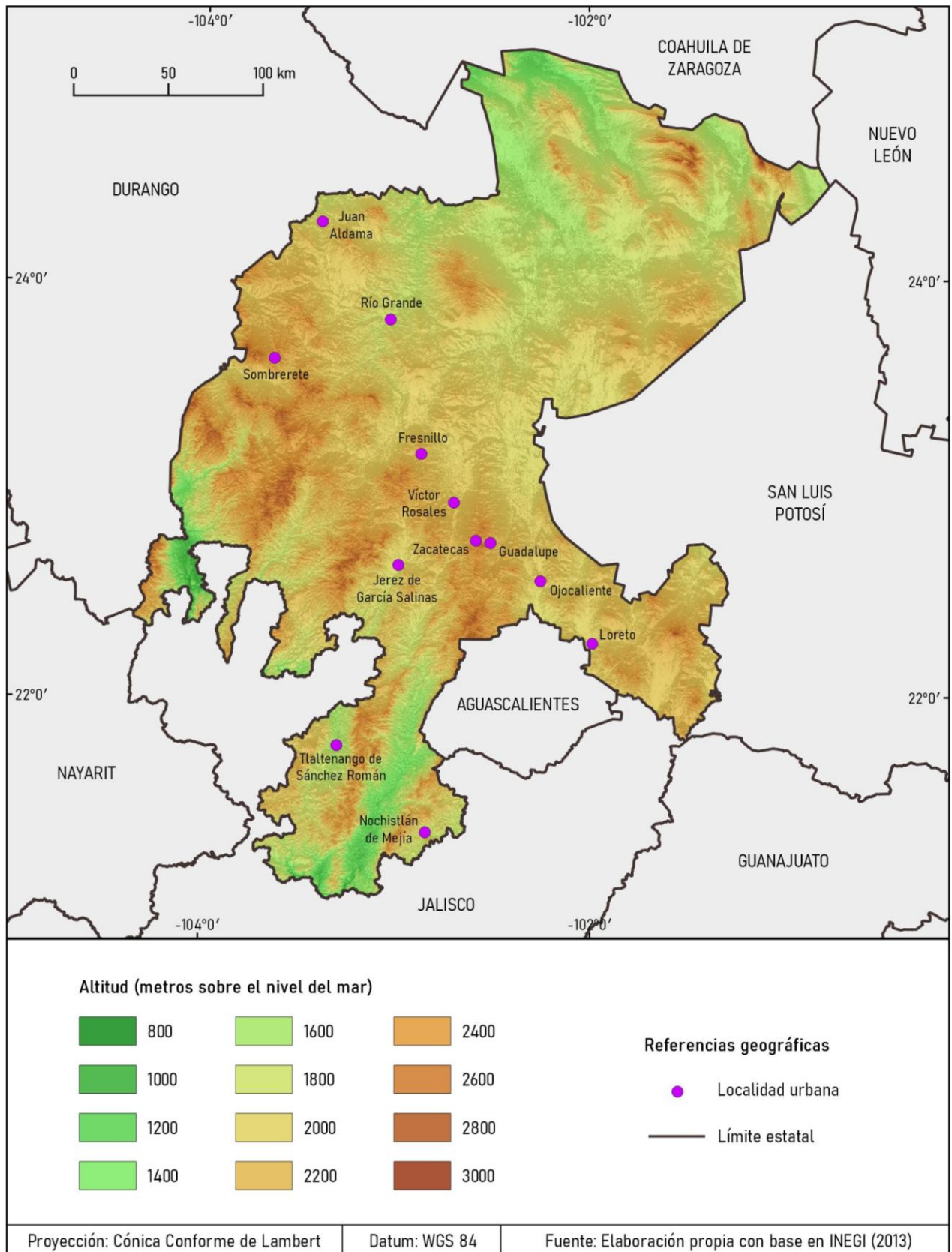


Figura 3.3. Tipos de clima en el estado de Zacatecas según la clasificación de Enriqueta García, 1998.

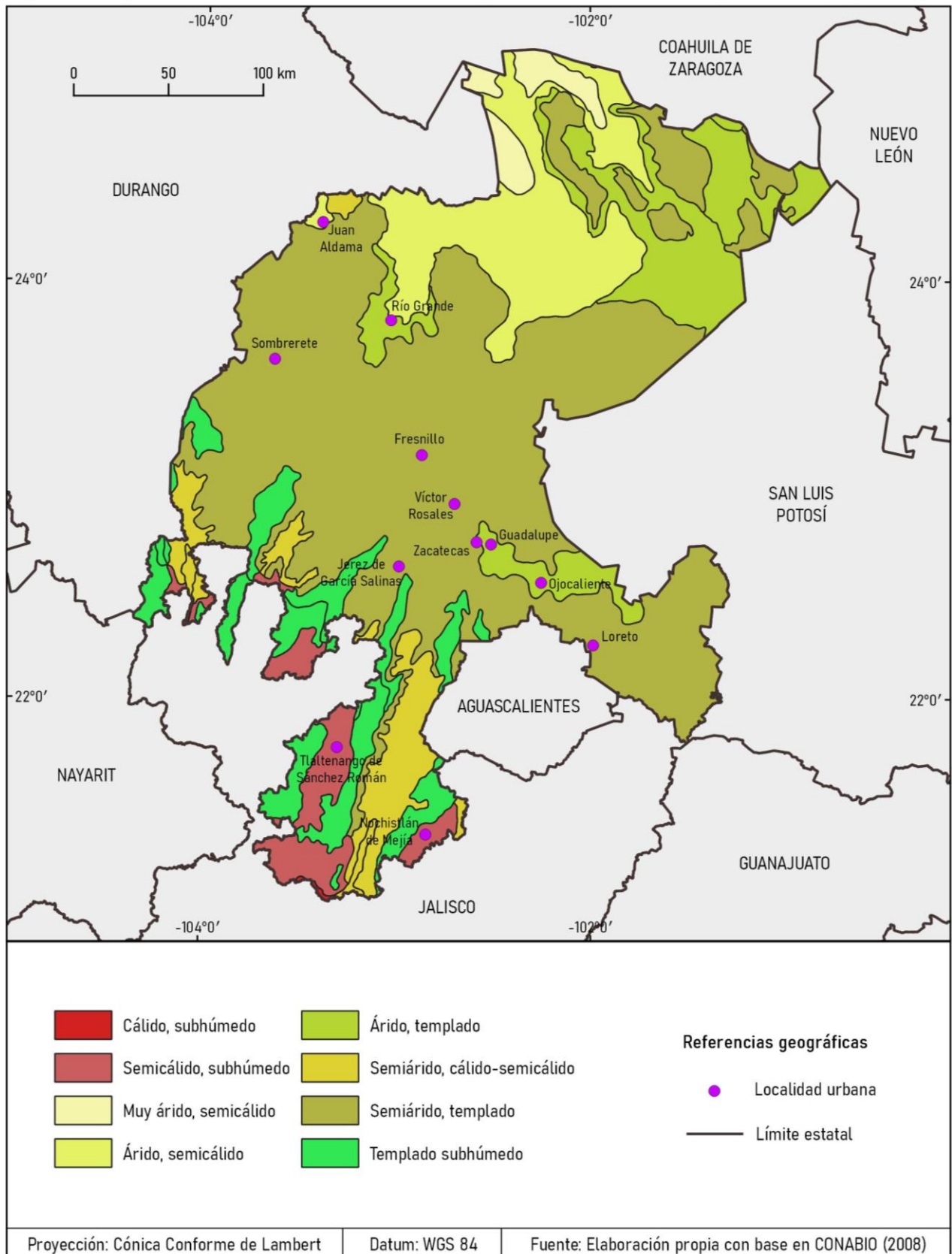


Figura 3.4. Temperatura media anual en el estado de Zacatecas, 1998.

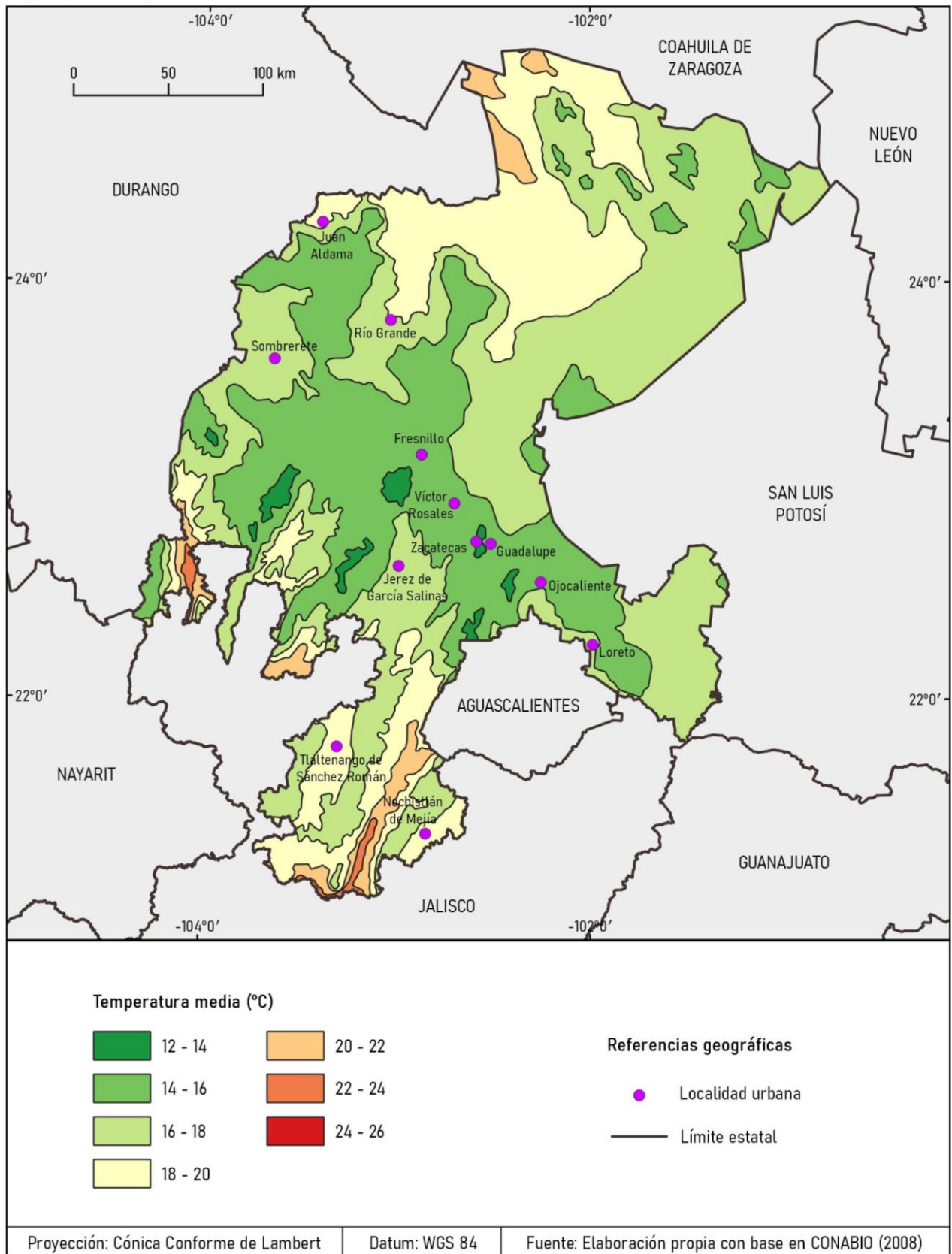


Figura 3.5. Precipitación anual en el estado de Zacatecas, 1998.

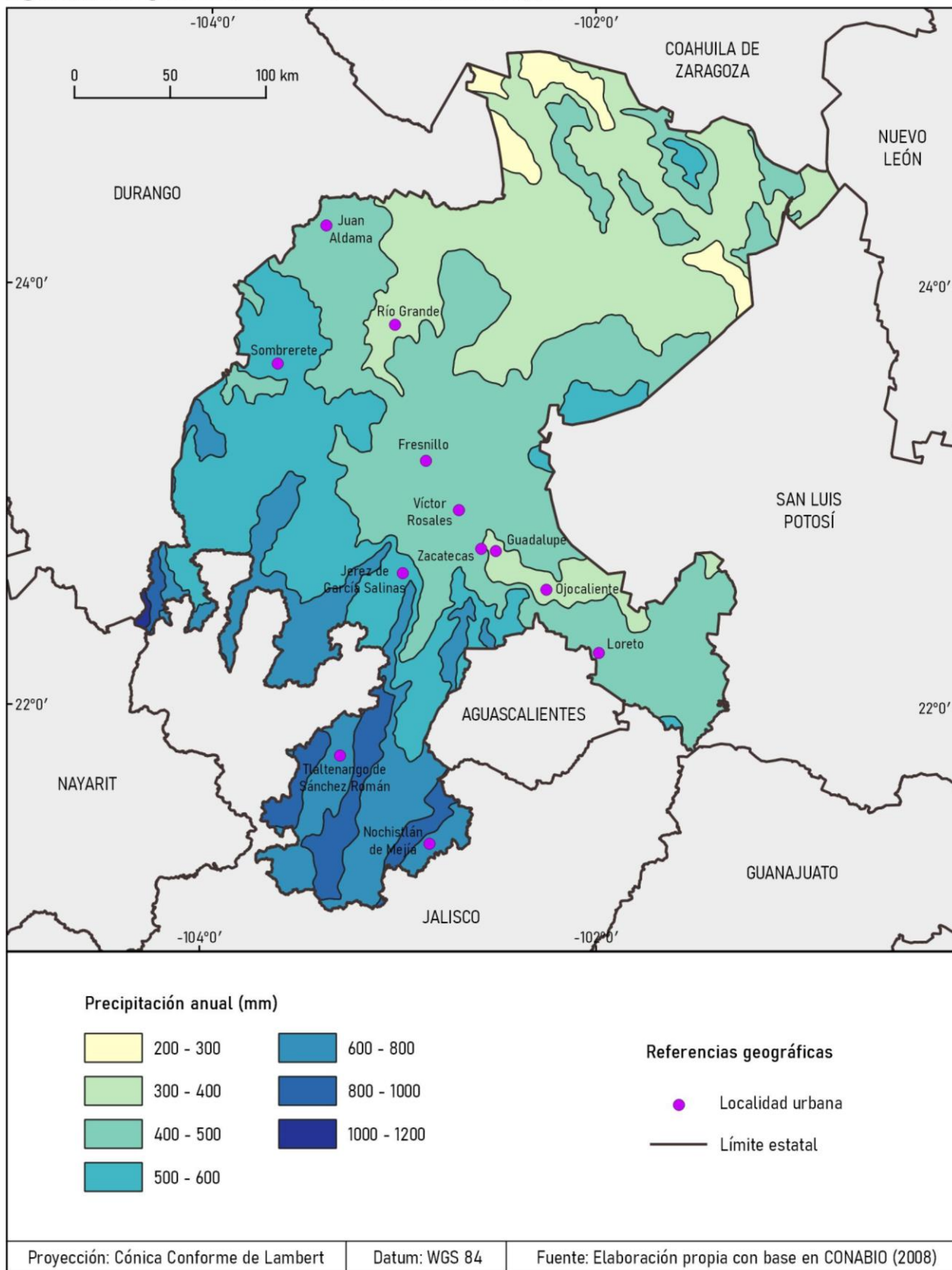


Figura 3.6. Insolación anual en el estado de Zacatecas, 1990.

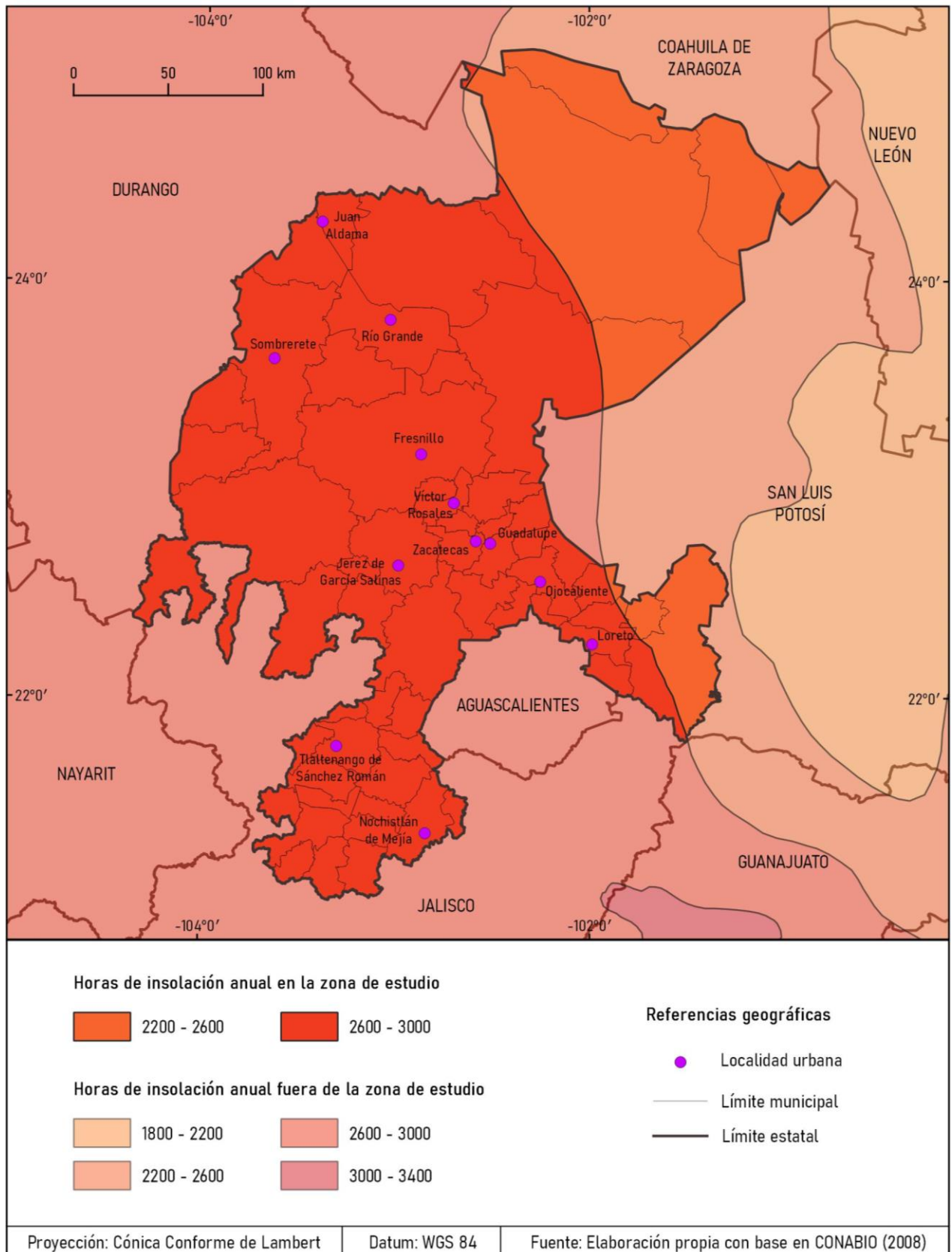


Figura 3.7. Peligro por presencia de sequías en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.

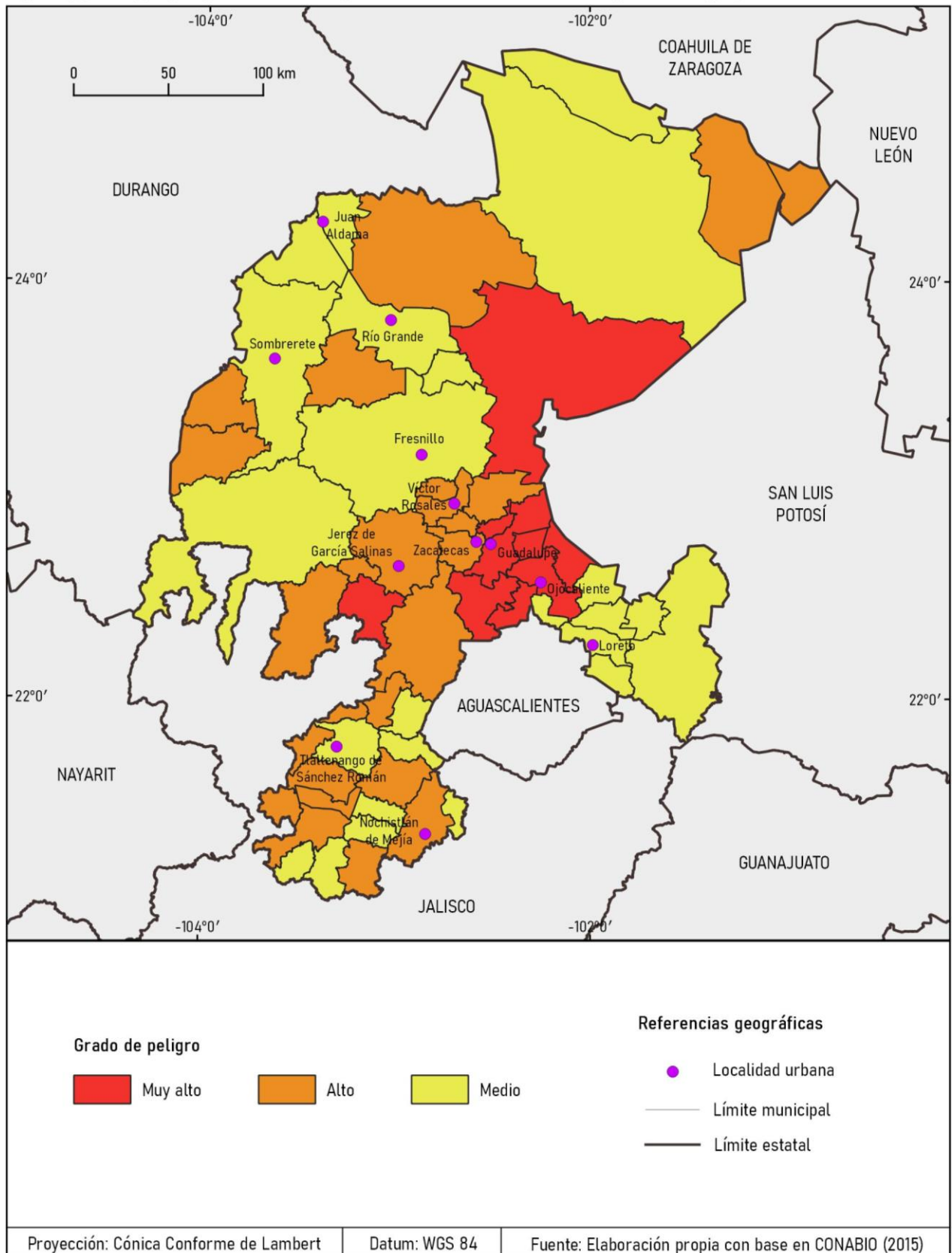




Figura 3.8. Peligro por presencia de ciclones tropicales en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.

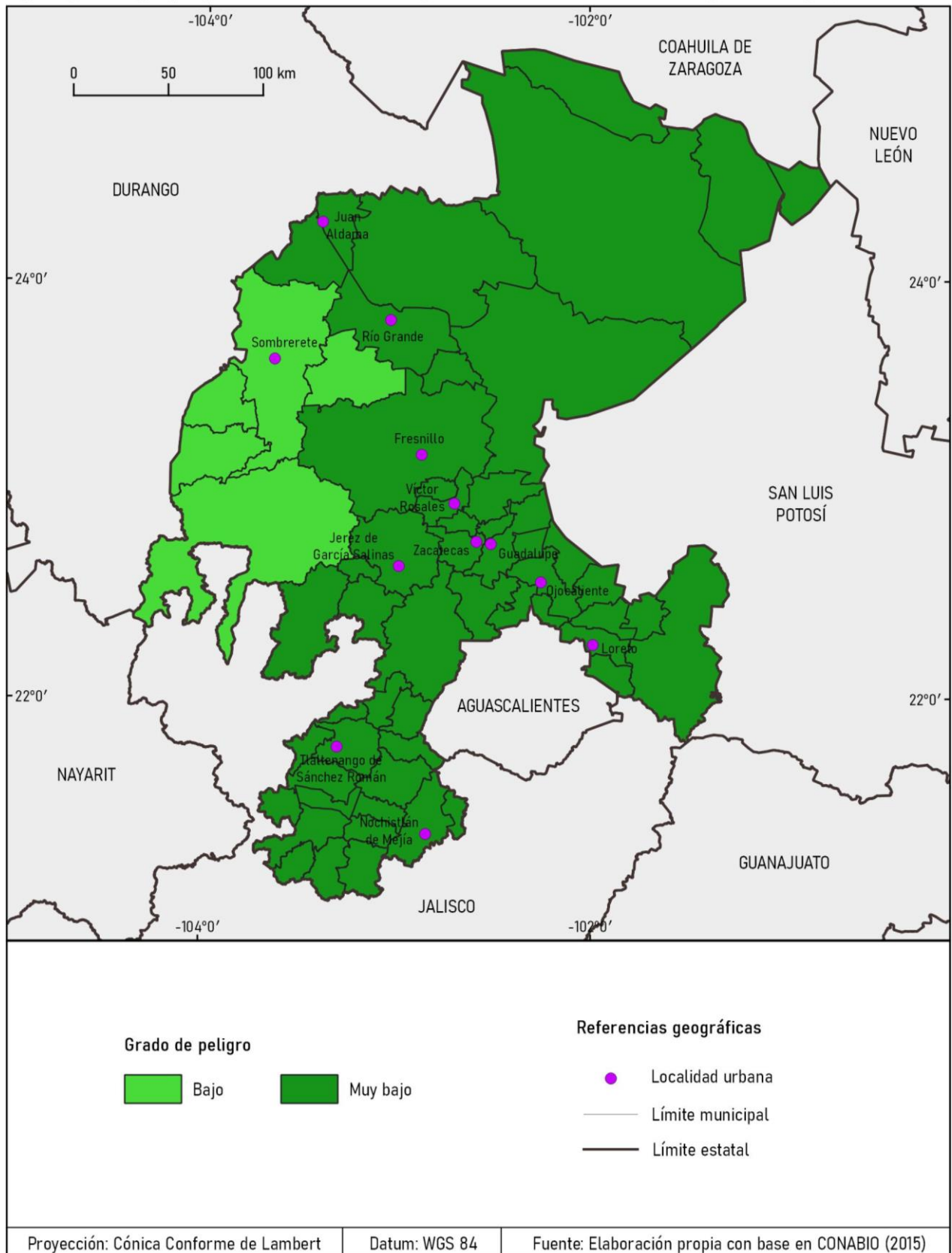


Figura 3.9. Peligro por presencia de tormentas de granizo en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.

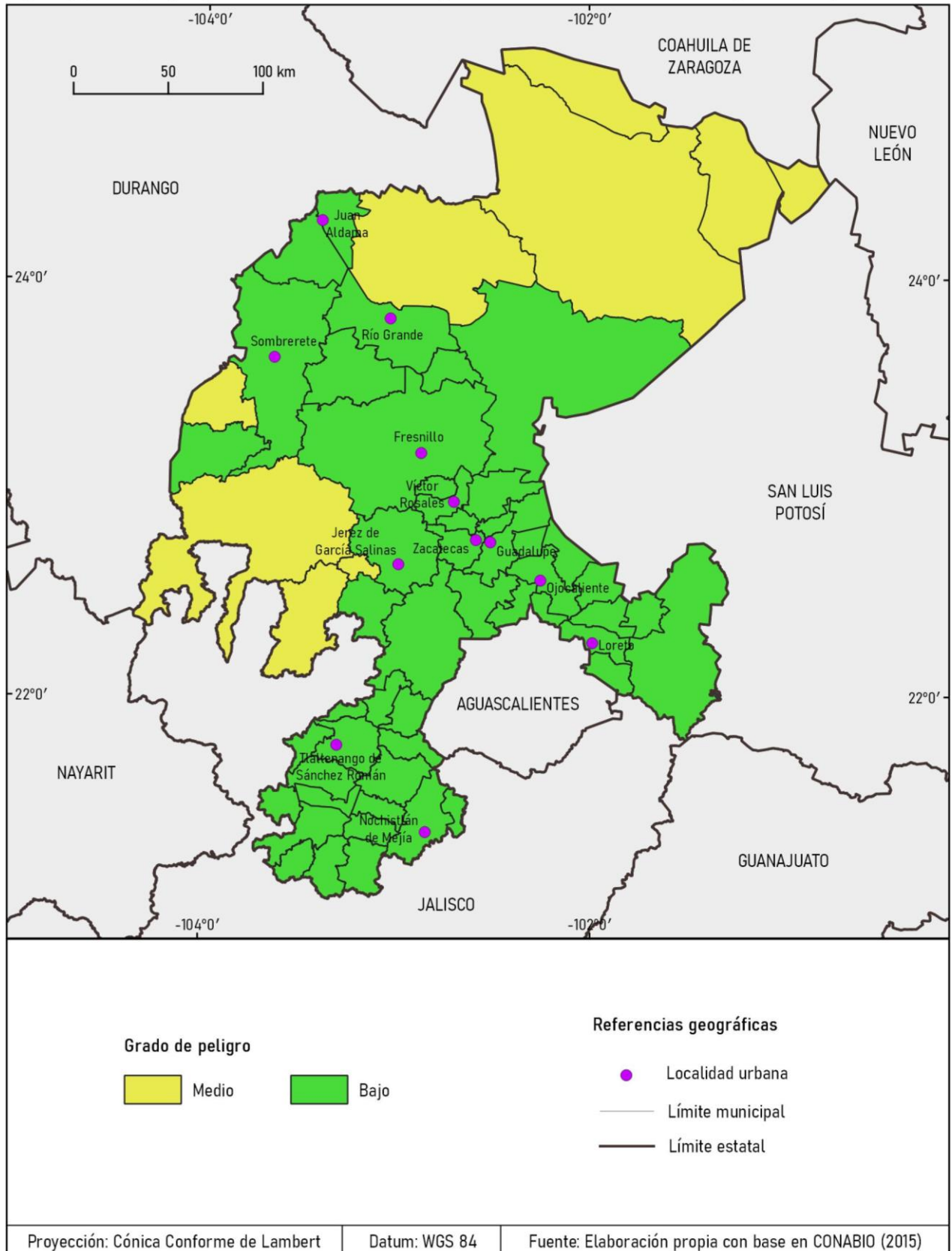


Figura 3.10. Peligro por presencia de nevadas en el estado de Zacatecas por municipio, 2012.

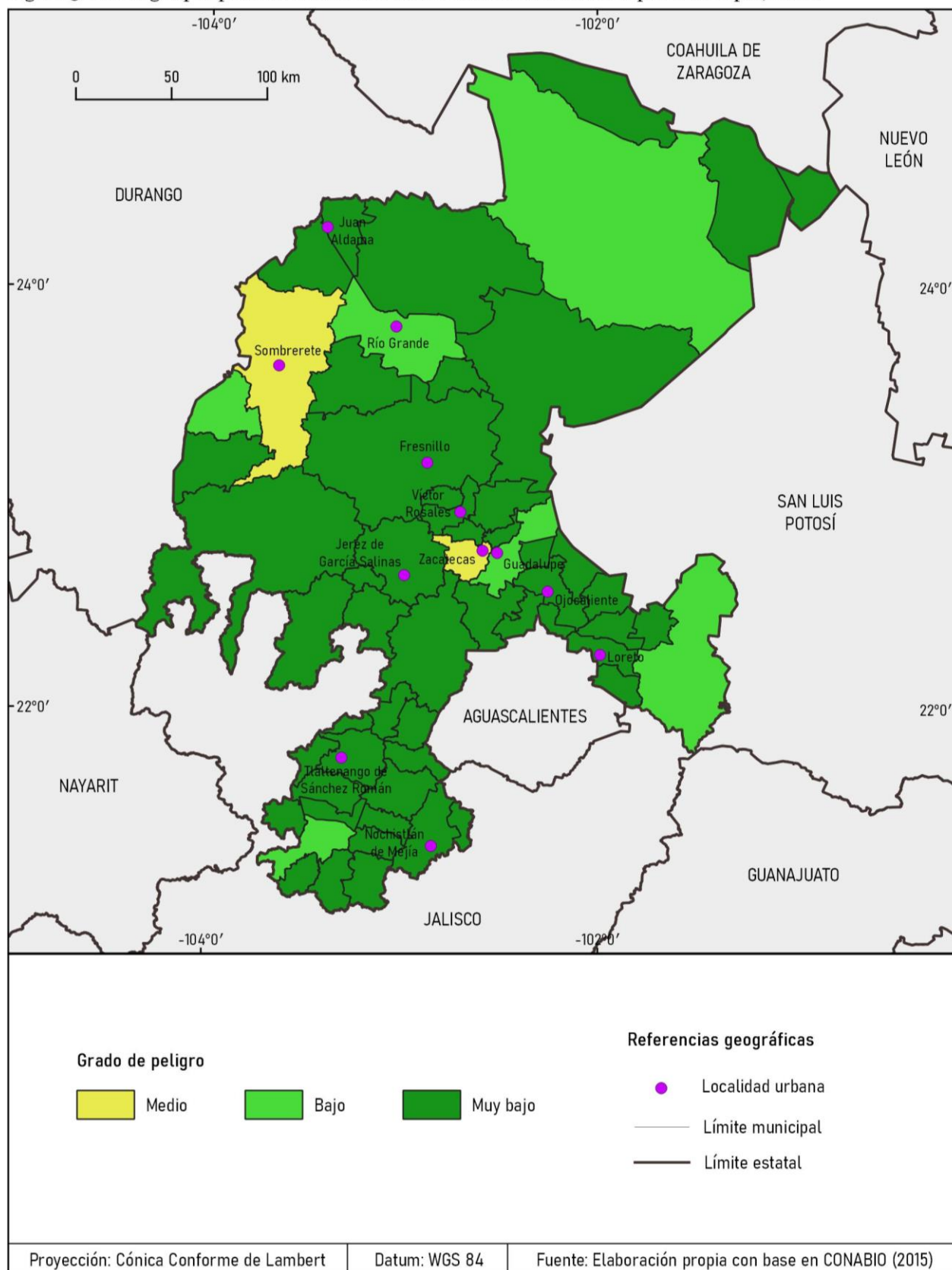


Figura 3.11. Uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 1997.

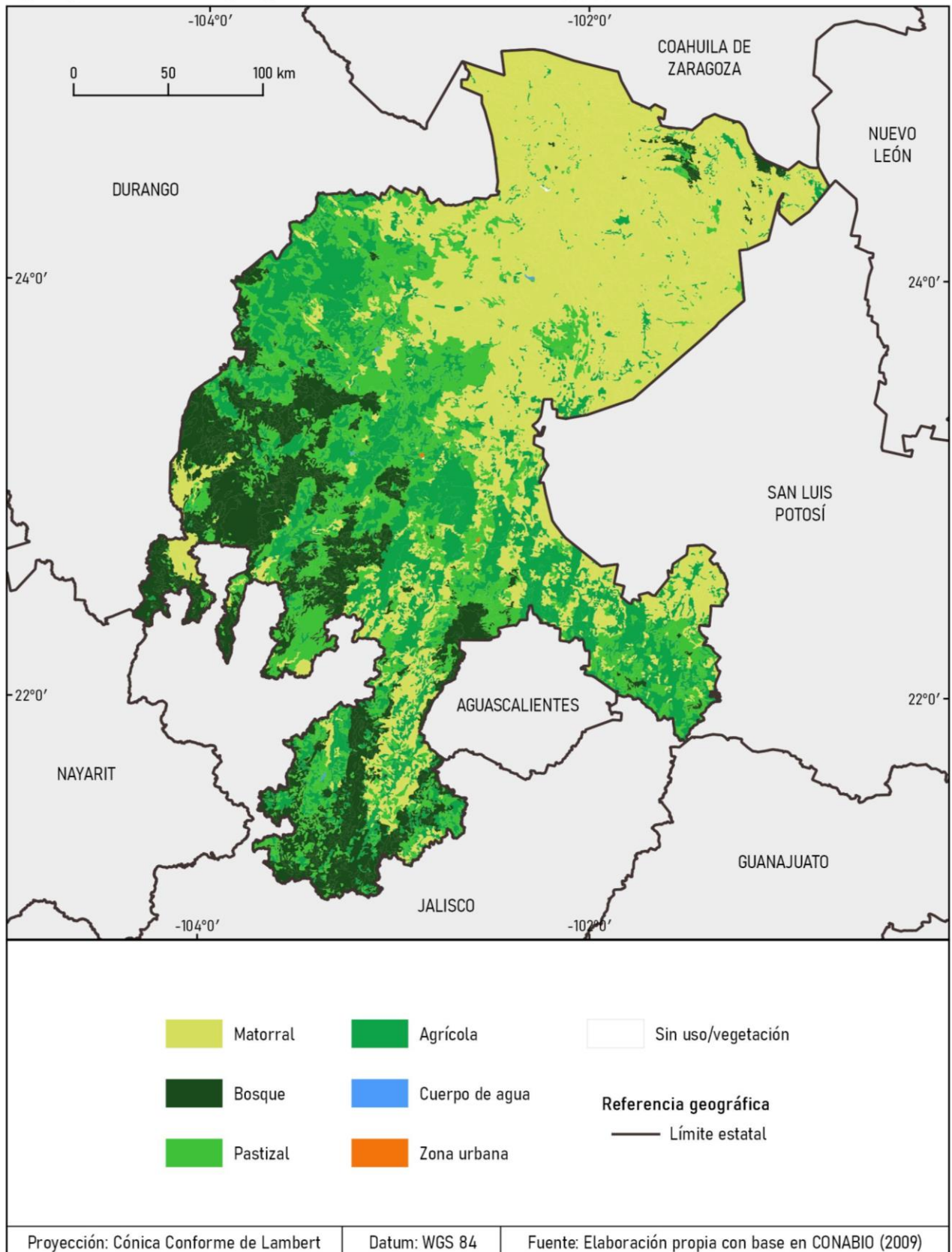


Figura 3.12. Uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 2005.

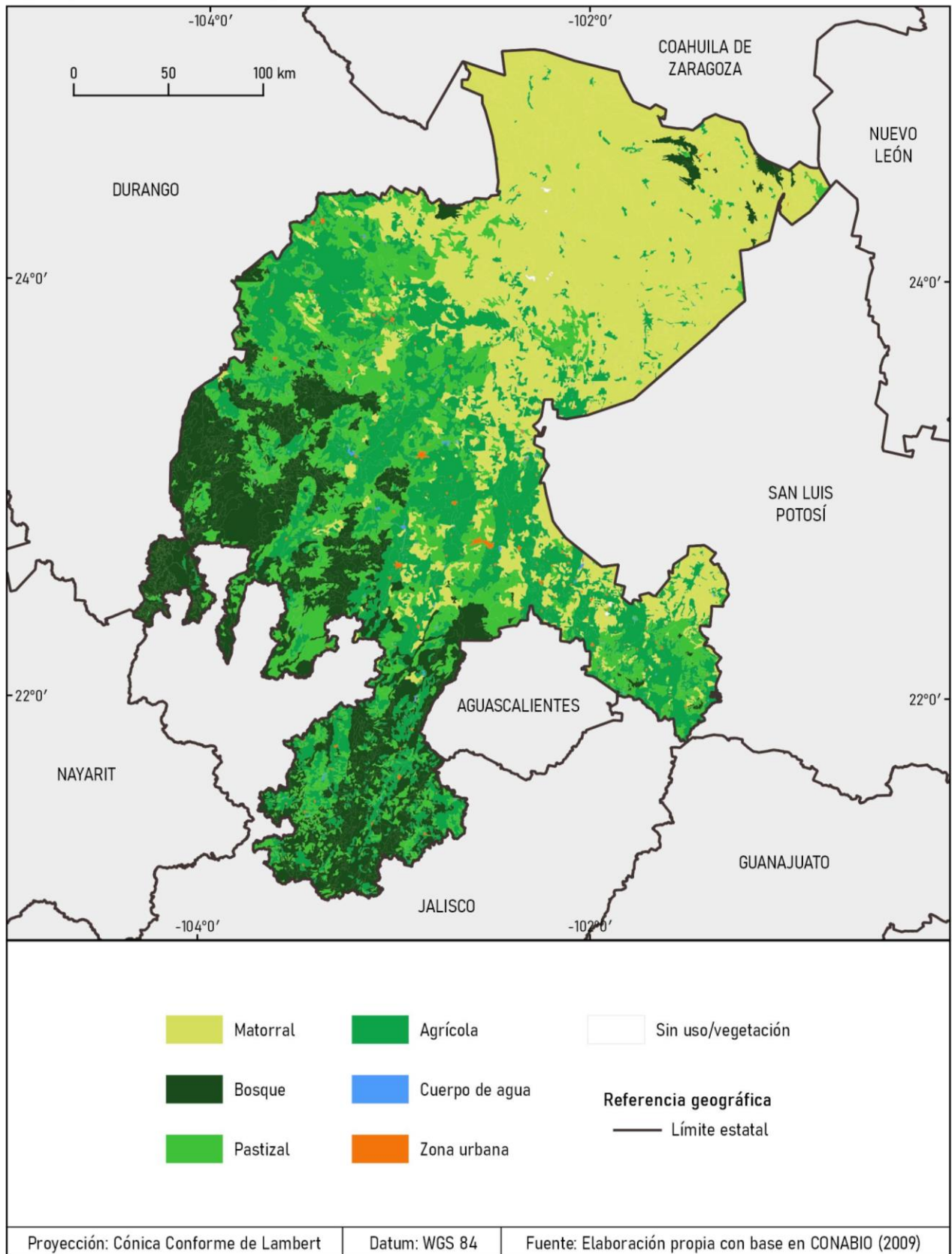


Figura 3.13. Uso del suelo y vegetación en el estado de Zacatecas, 2016.

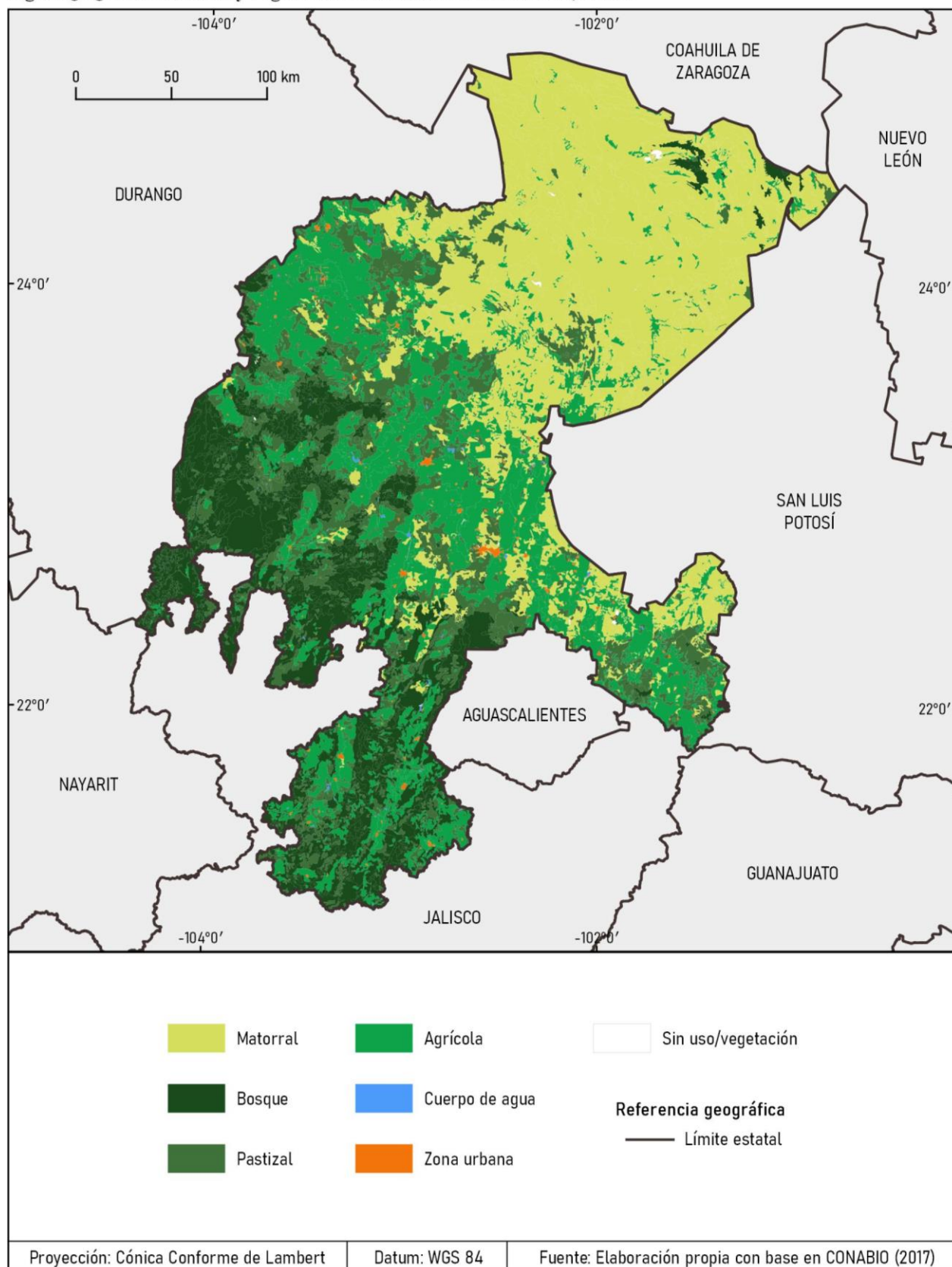
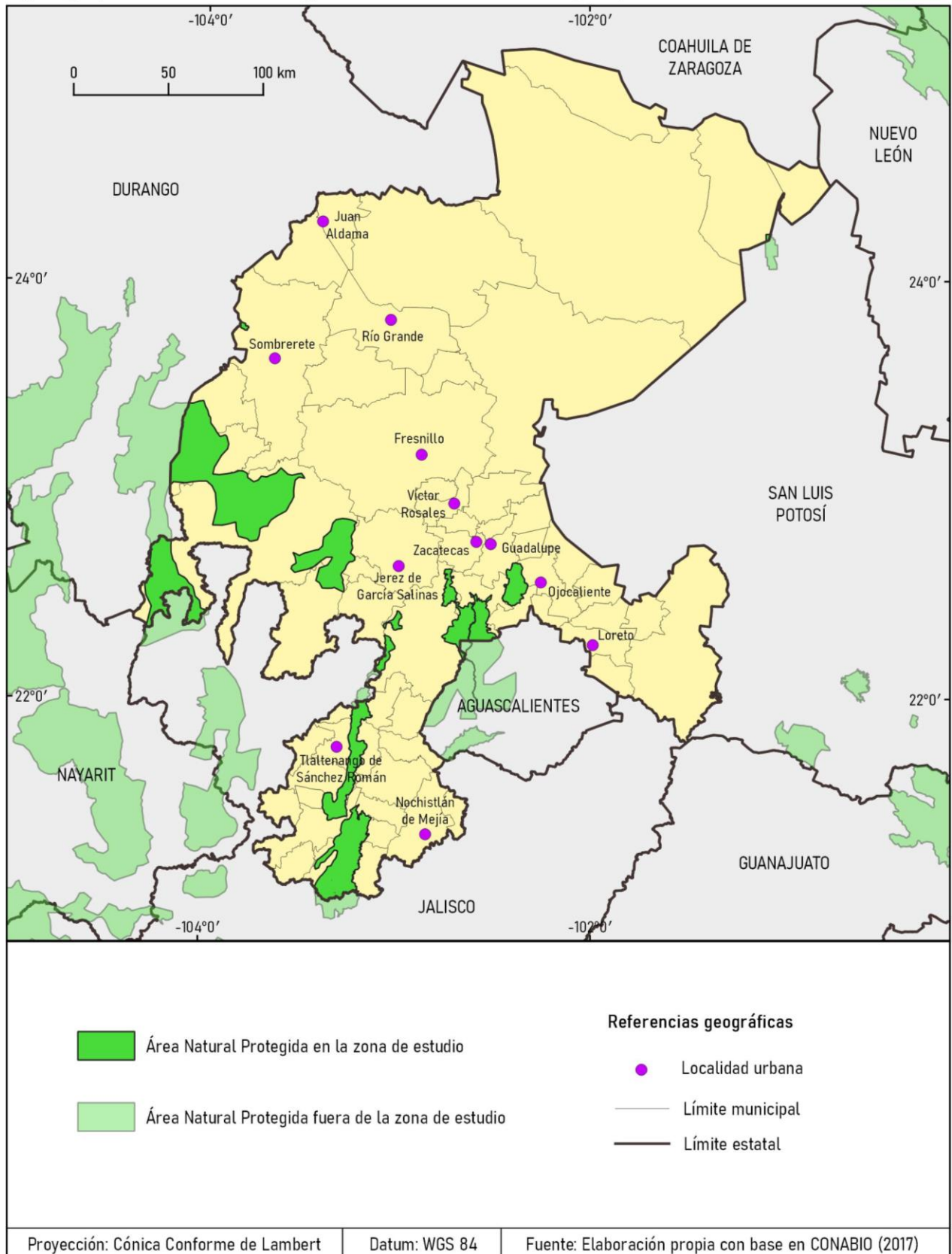


Figura 3.14. Áreas Naturales Protegidas en el estado de Zacatecas, 2017.



## 3.2. Sociedad

A pesar de que el estado de Zacatecas representa el 4 % de la superficie nacional, solamente el 1.3 % de la población total del país vive en esa entidad federativa. La densidad demográfica es de 20 habitantes por kilómetro cuadrado (hab/km<sup>2</sup>) y, por consiguiente, por debajo del promedio nacional que es de 57 hab/km<sup>2</sup>. En la figura 3.15 se puede apreciar que los siete municipios más poblados (Fresnillo, Guadalupe, Zacatecas, Pinos, Río Grande, Sombrerete y Jerez) se ubican sobre la franja diagonal del sureste al noroeste. Asimismo, los nueve municipios que tienen una mayor densidad de hab/km<sup>2</sup> que el promedio nacional se encuentran sobre esa franja imaginaria. Mientras que en el sur viven menos habitantes que en el norte, esta última zona se caracteriza por extensiones más grandes de los municipios y, por tanto, menor densidad demográfica. Parece interesante que el municipio donde se ubica la capital, Zacatecas, es el de mayor densidad demográfica, pero es solamente el tercer municipio más poblado de acuerdo con el total de sus habitantes.

Con respecto a la tasa de crecimiento medio anual (figura 3.16), se repite el mismo patrón espacial, puesto que el crecimiento alto constante desde 2000 a 2010, por arriba del promedio nacional, lo presentan diez municipios de esa región. La mayoría de los otros territorios con un crecimiento bajo se sitúan en el centro, uno, y otro en el sur y en el norte del estado zacatecano. Por el contrario, se nota que algunos municipios experimentaron una disminución de sus habitantes. El municipio de Teúl de González Ortega registró un decrecimiento alto, pero esto se debió a la formación del municipio de Santa María de la Paz en 2005. Debido al cambio político-administrativo, el de Teúl de González Ortega perdió una parte de sus habitantes y salió con un fuerte balance negativo. Entonces, en el caso de Santa María de la Paz, no se pudo aplicar la estimación, porque todavía no había existido en 2000.

En la figura 3.17, se caracteriza a la población por su estructura de edad y género, así como el promedio de hijos nacidos vivos por municipio. A nivel estatal, la población de 0 a 14 años (joven) era el 31 %, de 15 a 64 años (adulto) el 61 % y de 65 años y más (adulto mayor) el 8 % del total de los habitantes. En comparación con el promedio nacional, el estado de Zacatecas tenía relativamente más población joven y adulto mayor, pero menos habitantes adultos, que puede ser una consecuencia de la emigración de la población económicamente activa para mejorar sus condiciones laborales y, por ende, su calidad de vida. Indirectamente, se puede verificar esto con la tasa de fecundidad. De este modo, se



constata que los municipios de El Salvador y El Plateado de Joaquín Amaro eran los que presentaron el mayor número de hijos nacidos vivos en promedio, 4.1 y 4.2, respectivamente. No obstante, El Salvador llegó al doble de la población adulta mayor que el promedio estatal y El Plateado de Joaquín Amaro hasta el triple, siendo el municipio en el cual los habitantes de 65 años y más tenían la misma participación en la estructura por edad que los de 0 a 14 años. De esta manera, la emigración sería una razón probable para comprender esos resultados contradictorios, ya que los adultos mayores, así como los niños y los adolescentes permanecen en esos municipios, mientras que la población en edad de trabajar se traslada a otros territorios. Guadalupe y Zacatecas fueron los únicos territorios en los cuales la tasa de fecundidad terminó por debajo del promedio nacional. Melchor Ocampo, Mazapil, El Salvador, Benito Juárez y Concepción del Oro son cinco municipios en los que existe más población masculina que femenina. Villa de Cos presenta la particularidad de que al momento del censo realizado por INEGI había la misma cantidad de mujeres y hombres en su territorio. A excepción de Benito Juárez, resulta un patrón espacial interesante, porque se observa una concentración masculina en el noreste del estado de Zacatecas. En cambio, en 52 de los 58 municipios predomina numéricamente el sexo femenino, que se puede explicar a causa de la mayor esperanza de vida de las mujeres y por el hecho de que los hombres emigran más.

Otras características de la población son la presencia de hablantes de una lengua indígena, la población inmigrante y con discapacidad. Con respecto a la primera variable, se puede concluir que no es muy significativa en el estado de Zacatecas, porque solamente el 0.4 % de su población afirmó hablar una lengua indígena en 2010. Mientras que el 6.2 % de la población del todo el país habló alguna de esas lenguas, el municipio de Valparaíso, que colinda con los estados de Durango, Jalisco y Nayarit, llegó a un 2.3 %, siendo el líder en esa categoría. Por eso, se representaron la población inmigrante (figura 3.18) y la población con discapacidad (figura 3.19), descartando a la otra característica. De esas dos variables se buscó mostrar su distribución espacial. Igualmente se menciona que los municipios con mayor participación de la población de 65 años y más, pueden presentar relativamente más habitantes con discapacidades, porque se incluyen en éstas también las limitaciones acústicas, motrices y visuales, que pueden aparecer en la edad avanzada.

La figura 3.20 representa el grado de marginación y la población sin derechohabencia a servicios de salud, en instituciones como el Instituto Mexicano del Seguro Social, el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado

o el Seguro Popular. El índice de marginación incluye nueve indicadores: la población de 15 años o más analfabeta (1) y sin primaria completa (2), los ocupantes en viviendas sin drenaje ni excusado (3), sin energía eléctrica (4), sin agua entubada (5), con piso de tierra (6), las viviendas con algún nivel de hacinamiento (7), la población en localidades con menos de 5 000 habitantes (8) y la población ocupada con ingresos de hasta 2 salarios mínimos (9).

Para el estado de Zacatecas se estimó el grado medio de marginación, con el que se encuentra en el lugar 13 al nivel nacional (Consejo Nacional de Población 2012). En los indicadores 2, 7, 8 y 9 se alcanzaron valores altos que se equilibran con los buenos resultados en los demás. A nivel municipal, se aprecia que hay solamente un municipio con el grado de marginación alto, mientras que los tres con la calificación muy baja, así como la mayoría de los que presentan calificación baja se ubican sobre la franja diagonal del centro. Asimismo, el sur tuvo buenos resultados. Los indicadores pueden afectar a la salud humana de manera directa o indirecta, por lo que se muestra también la seguridad del acceso a la atención médica de los habitantes. Los municipios en los que más de la mitad de la población total no cuenta con la derechohabiencia a los servicios de salud, se sitúan de manera dispersa fuera de la franja diagonal. En cambio, en Fresnillo (29.8 %), Guadalupe (21.7 %) y Zacatecas (22.6 %), que son los municipios más poblados, se alcanzaron los porcentajes bajos de habitantes no afiliados a las instituciones públicas de salud.

Por último, el grado de urbanización relativa es la cantidad de habitantes que residen en espacios urbanos, en este caso, lugares con al menos 15 000 habitantes, con respecto al total de la población del municipio. Si el resultado da más de 50 %, más de la mitad de la población vive en localidades urbanas. Si no hay urbanización en el territorio, significa que toda la población habita en localidades con menos de 15 000 personas y, por ende, el municipio es completamente de carácter rural. Dentro del índice de marginación están incluidos varios indicadores con respecto a la situación de las viviendas. Pero vale la pena añadir más características para generar una visión más detallada de éstas en el estado de Zacatecas. El uso de leña o carbón como combustible en la cocina es peligroso para la salud humana por el humo y los gases a los que se exponen las personas. Por eso, una vivienda en la que se emplean esos materiales se evalúa de manera negativa; el gas natural se determina como la mejor opción. Por el contrario, la disposición de aparatos electrodomésticos como el refrigerador, la lavadora, la televisión o la computadora se valora como positiva. Cabe mencionar que la adquisición de computadoras e internet

aparece como muy escasa en los resultados, lo que se debe aparentemente al año de la realización del censo en 2010. Sobre todo, el internet tuvo su gran auge después. Aun así, se incluyeron esas variables, porque se conciben como el equipamiento básico en una vivienda moderna; además, la computadora y el internet son importantes para ciertas profesiones y la comunidad estudiantil.

La combinación del grado de urbanización y las características de una vivienda (figura 3.21) ha de comprobar una relación entre ambos, porque los procesos de urbanización deben aumentar la calidad de los hogares. No obstante, es evidente que las viviendas en las periferias o los barrios fragmentados de las ciudades pueden mostrar de manera igual déficits en su dotación. En cuanto a los resultados, se puede constatar que los municipios con las peores condiciones en las viviendas se caracterizan por la ausencia de localidades urbanas, puesto que su población vive sin excepción en lugares con menos de 15 000 habitantes, por lo que no se registra la urbanización en tales casos. En cambio, los territorios en los que su población reside principalmente en espacios urbanos señalan mejores condiciones, que significa, por ejemplo, la disposición de los aparatos electrodomésticos seleccionados. En general, existen solamente dos municipios con urbanización fuera de la franja diagonal del centro, mientras que la mayoría dentro de esta región presenta una concentración de los habitantes en localidades urbanas. El territorio de Pinos es el único con condiciones muy malas en las viviendas, que se encuentra en tal región. Al contrario, el municipio de Morelos es la excepción en cuanto al territorio sin urbanización, pero con una buena situación en las viviendas.

En resumen, en la franja diagonal del centro del estado zacatecano se concentran los municipios con la mayor cantidad de habitantes, la mayor densidad demográfica, el mayor crecimiento poblacional, la mayor derechohabiencia a los servicios de salud pública, el grado de marginación más bajo, las mejores condiciones de las viviendas y el mayor grado de urbanización.

Figura 3.15. Distribución de la población en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.

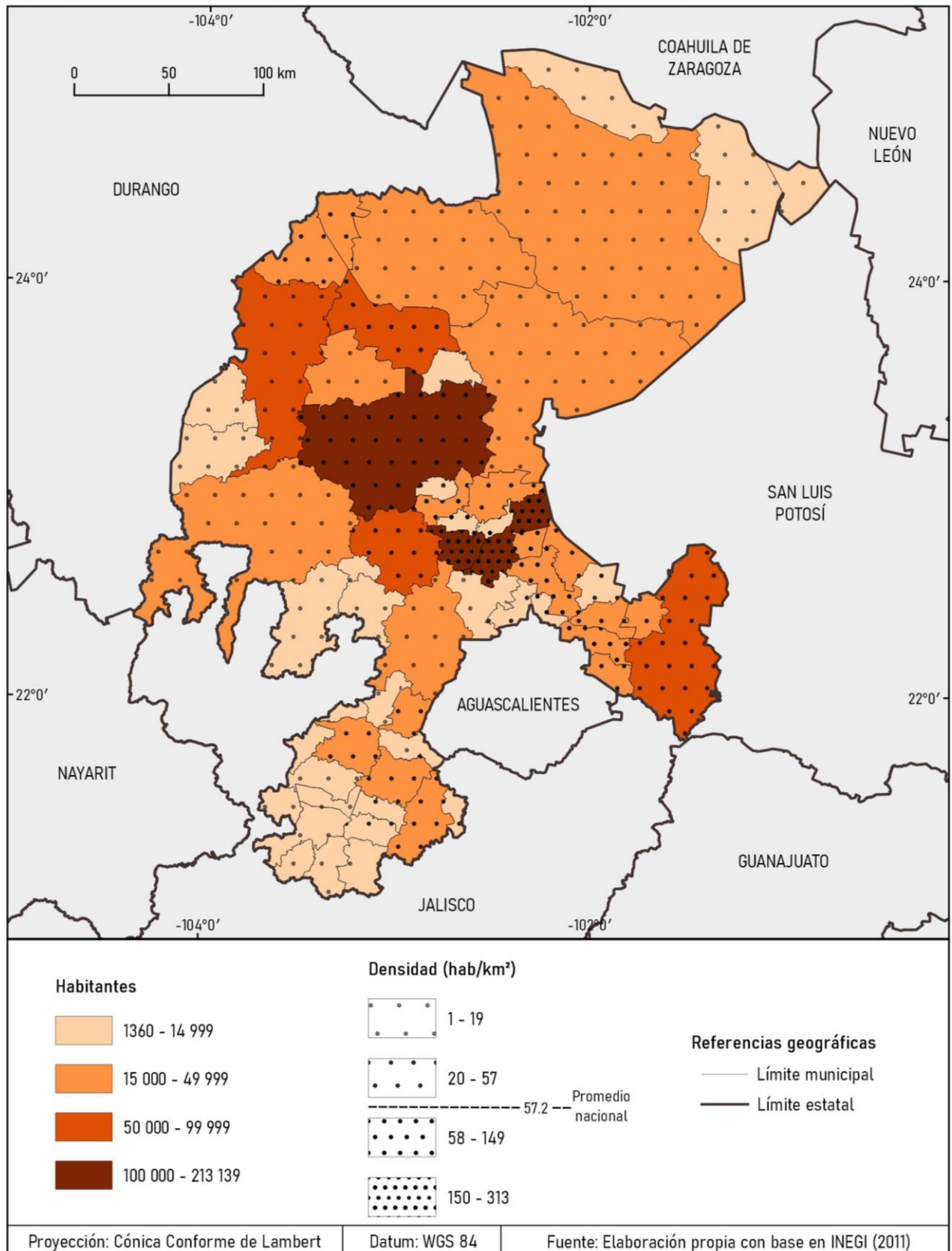


Figura 3.16. Evolución de la población en el estado de Zacatecas por municipio, 2000-2010.

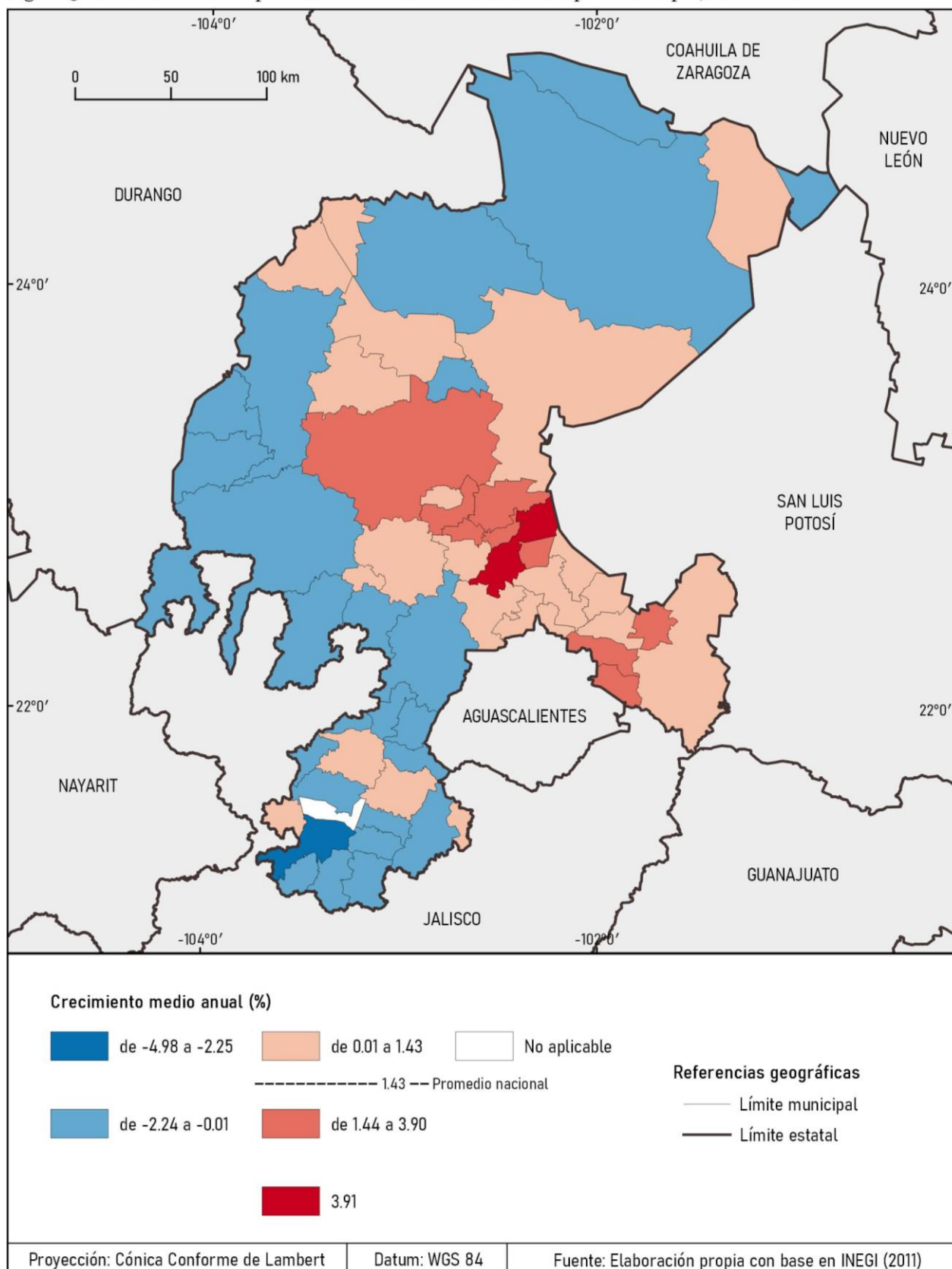


Figura 3.17. Estructura por edad y género de la población en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.

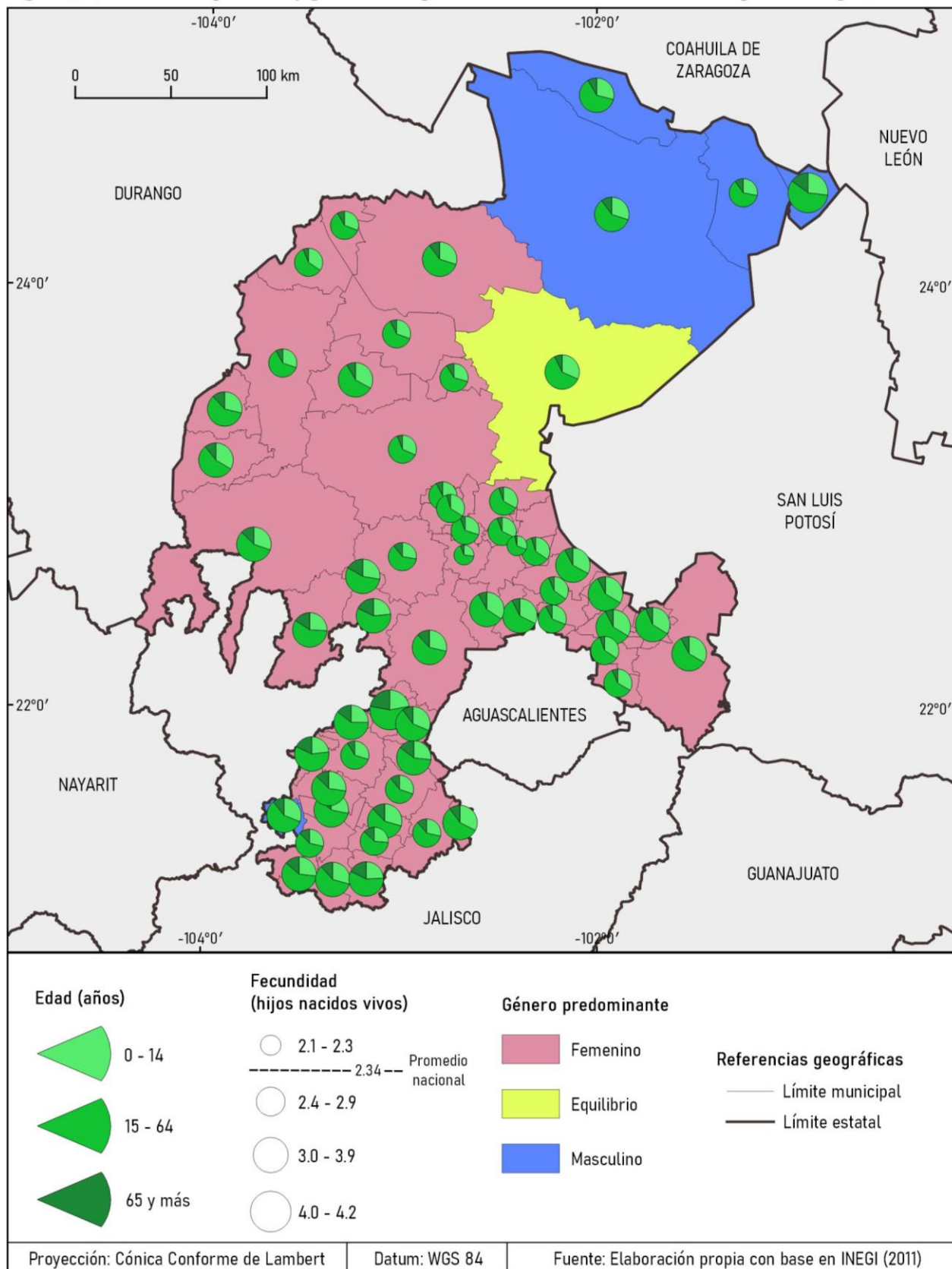


Figura 3.18. Población inmigrante en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.

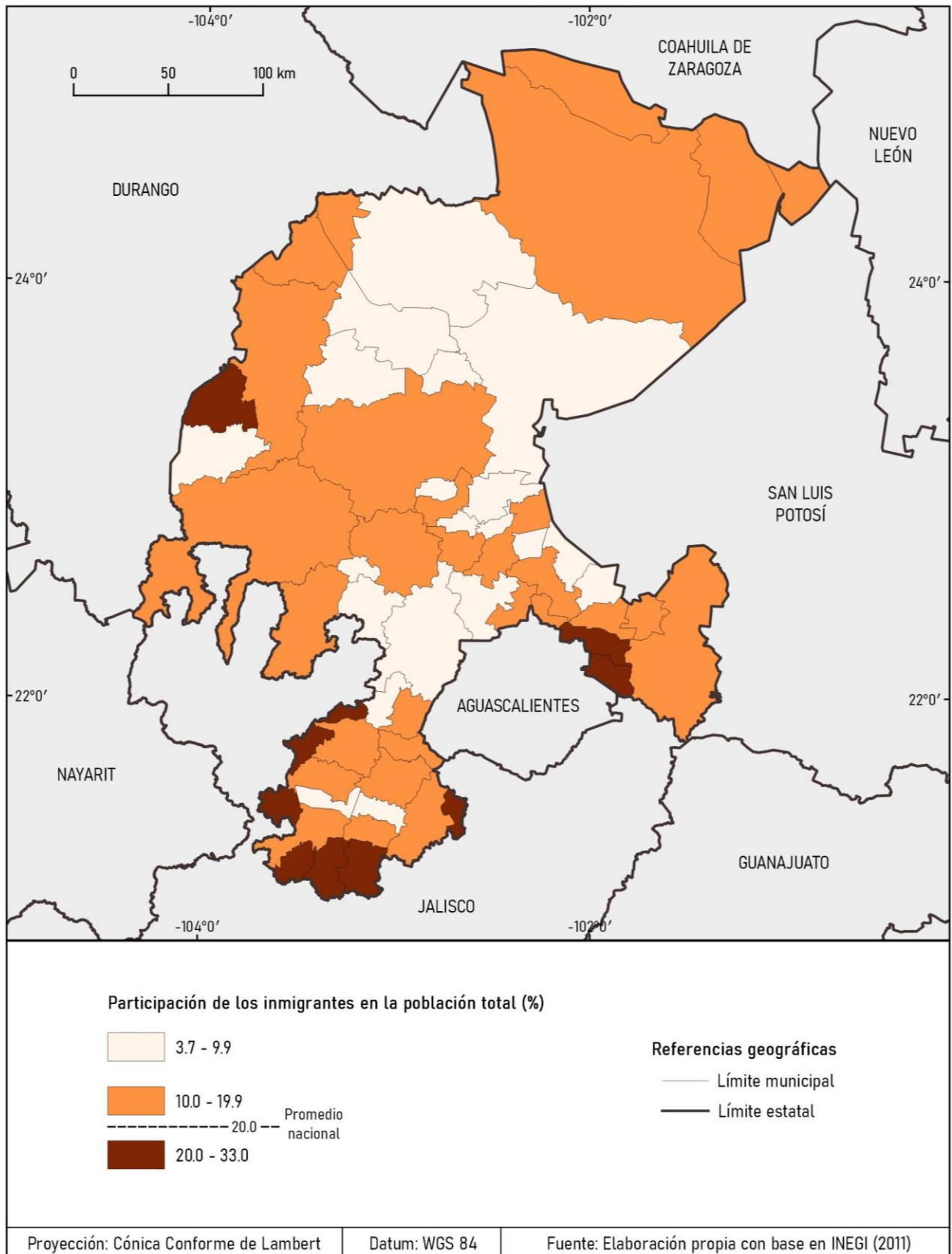


Figura 3.19. Población con discapacidad en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.

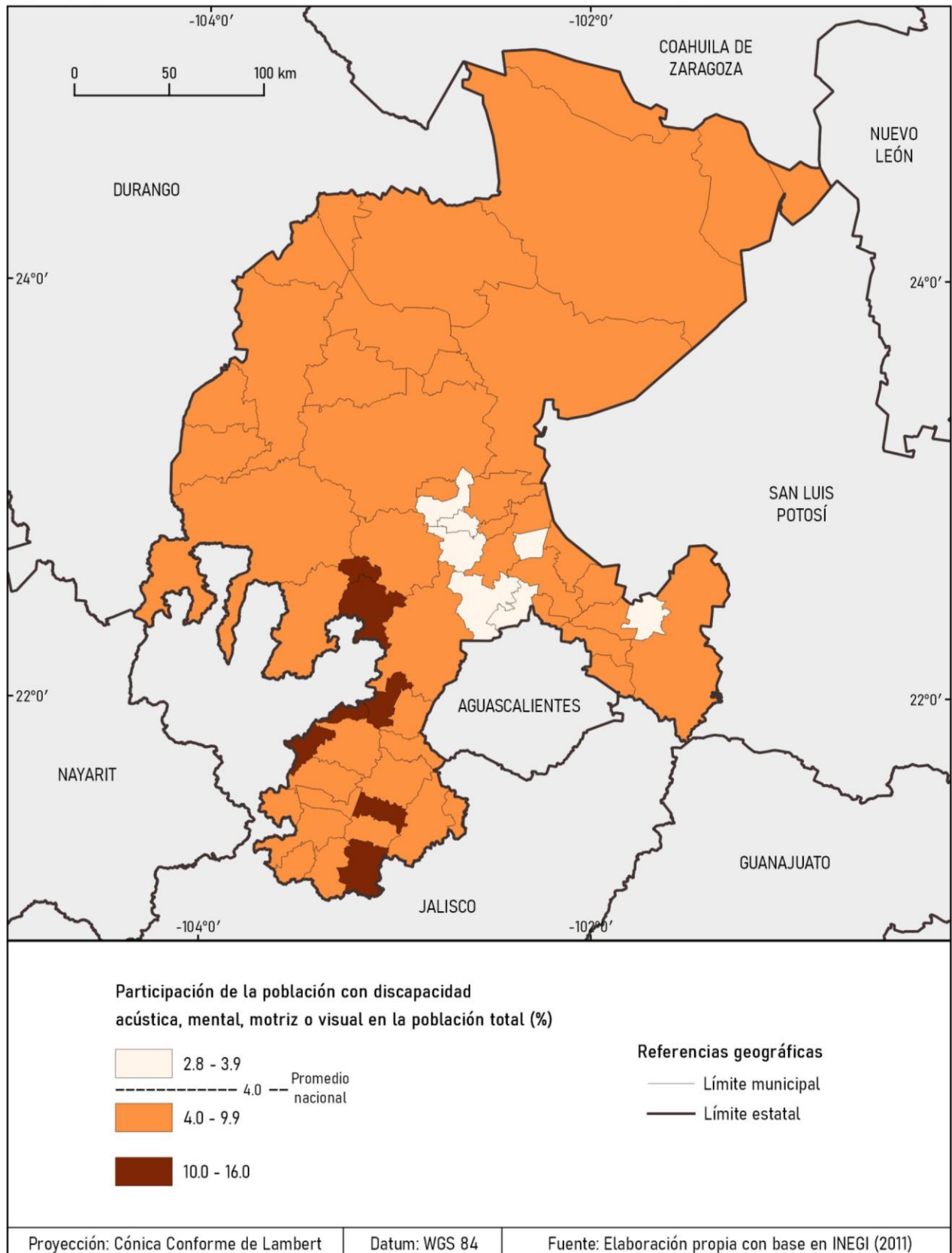




Figura 3.20. Marginación y acceso a servicios de salud pública en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.

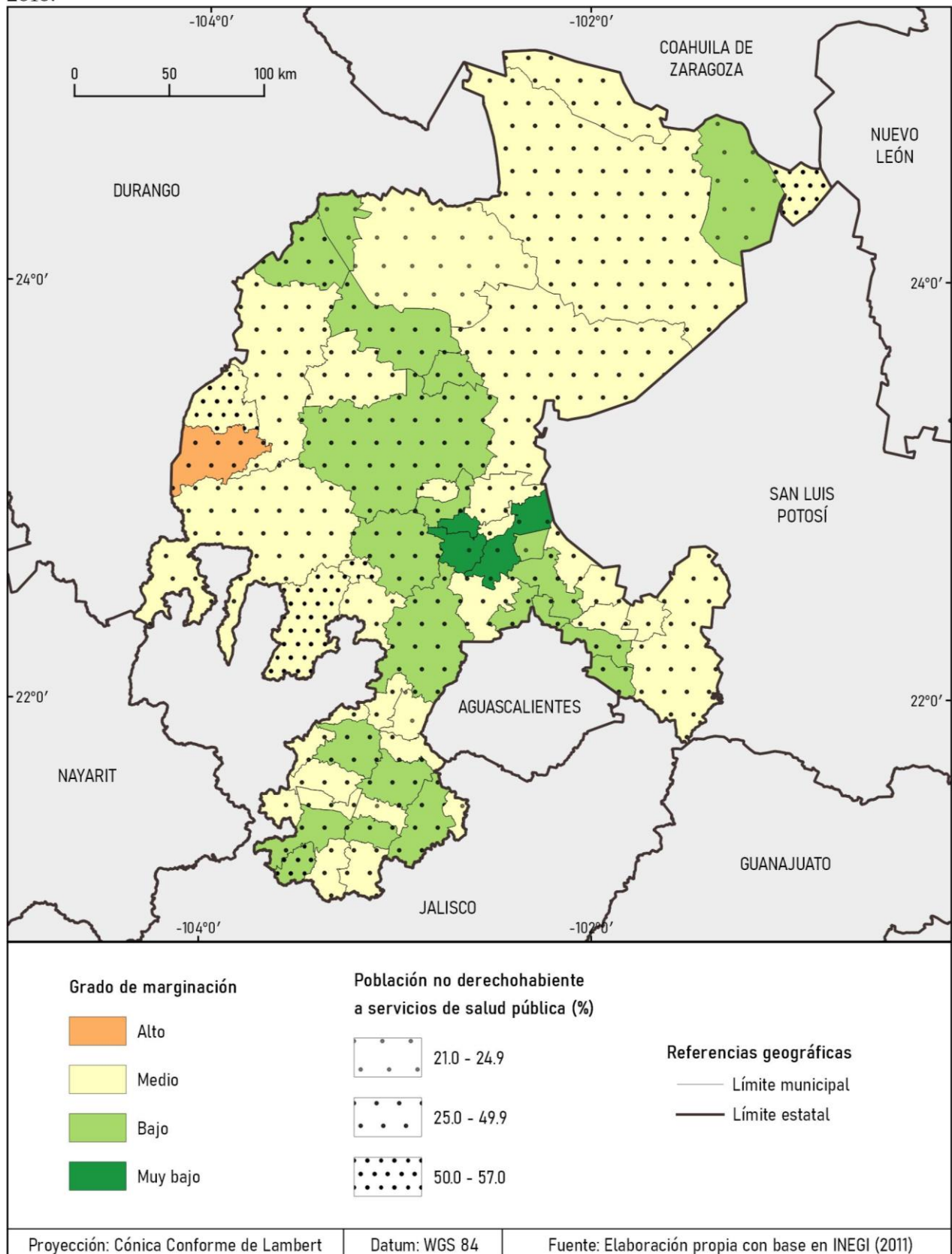
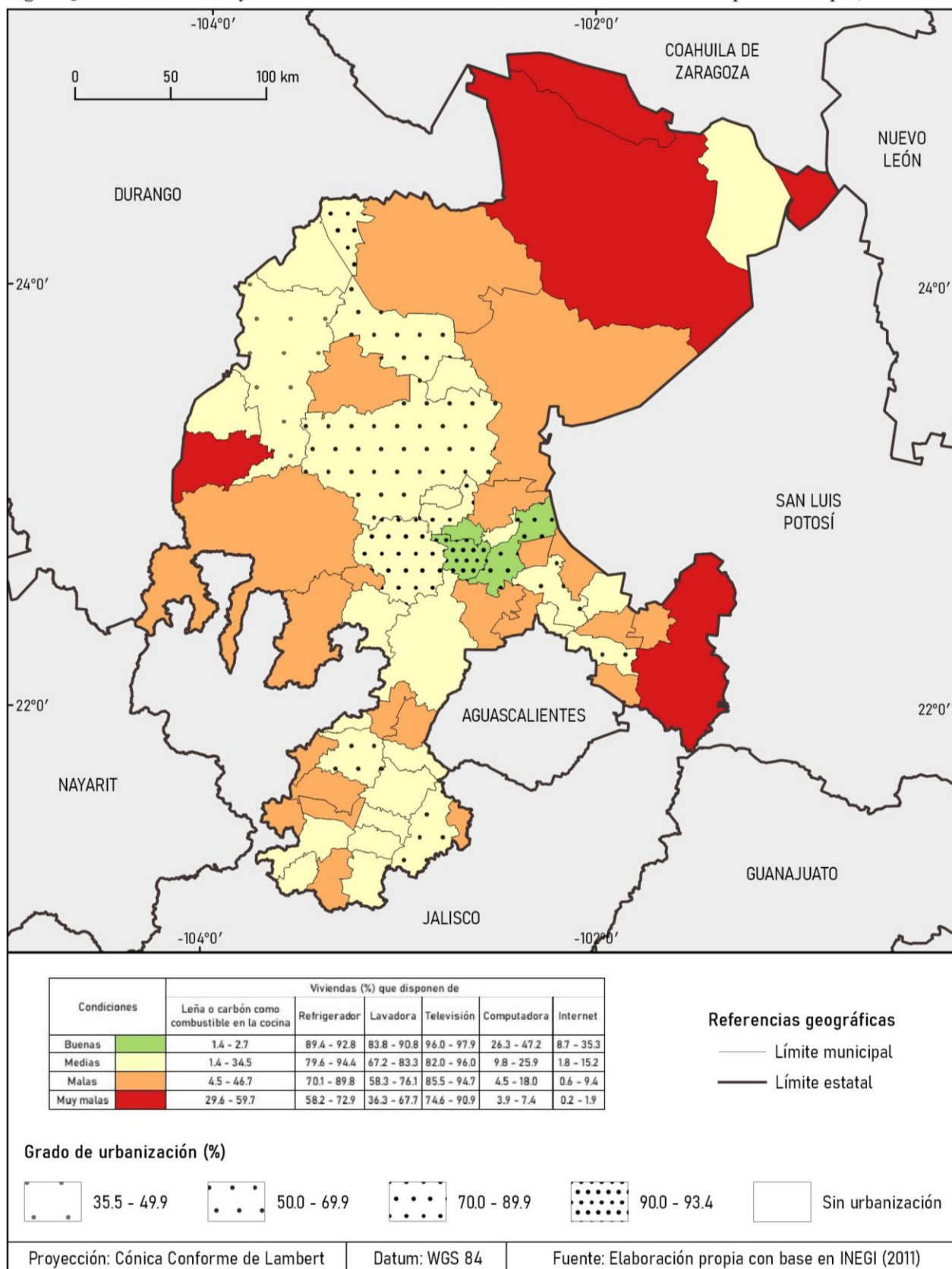


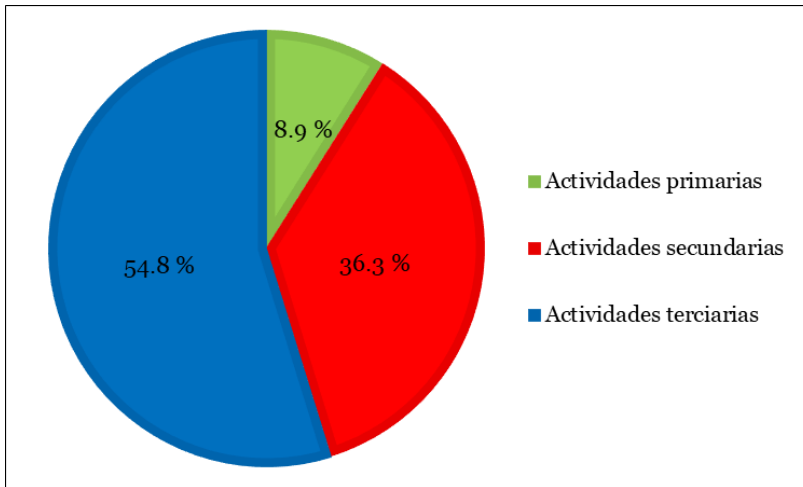
Figura 3.21. Urbanización y condiciones de las viviendas en el estado de Zacatecas por municipio, 2010.



### 3.3. Economía

De acuerdo con INEGI (2018), las actividades terciarias llegaron a un 55 % del PIB del estado de Zacatecas en 2016. Después del predominio de los servicios y el comercio, las actividades secundarias contribuyeron con el 36 %, mientras que las primarias con apenas el 9 % (figura 3.22).

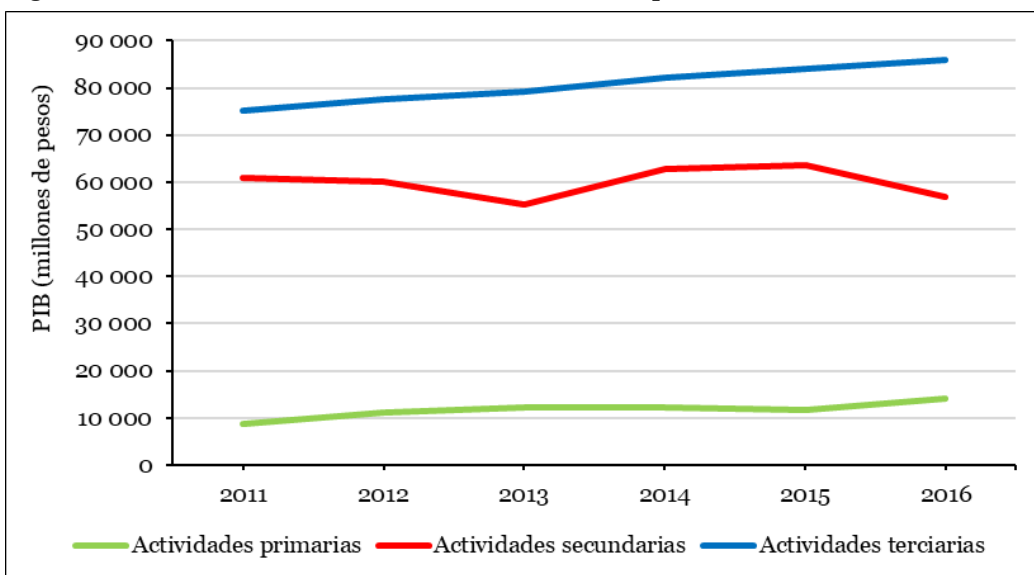
Figura 3.22. PIB del estado de Zacatecas por sector económico, 2016.



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).

Si se toma en cuenta la evolución del PIB desde el 2011 (figura 3.23), se constata que solamente las actividades terciarias tuvieron un crecimiento constante. El sector secundario mostró altas y bajas, mientras que las actividades primarias se mantuvieron estables durante el periodo con una tendencia creciente para el 2016.

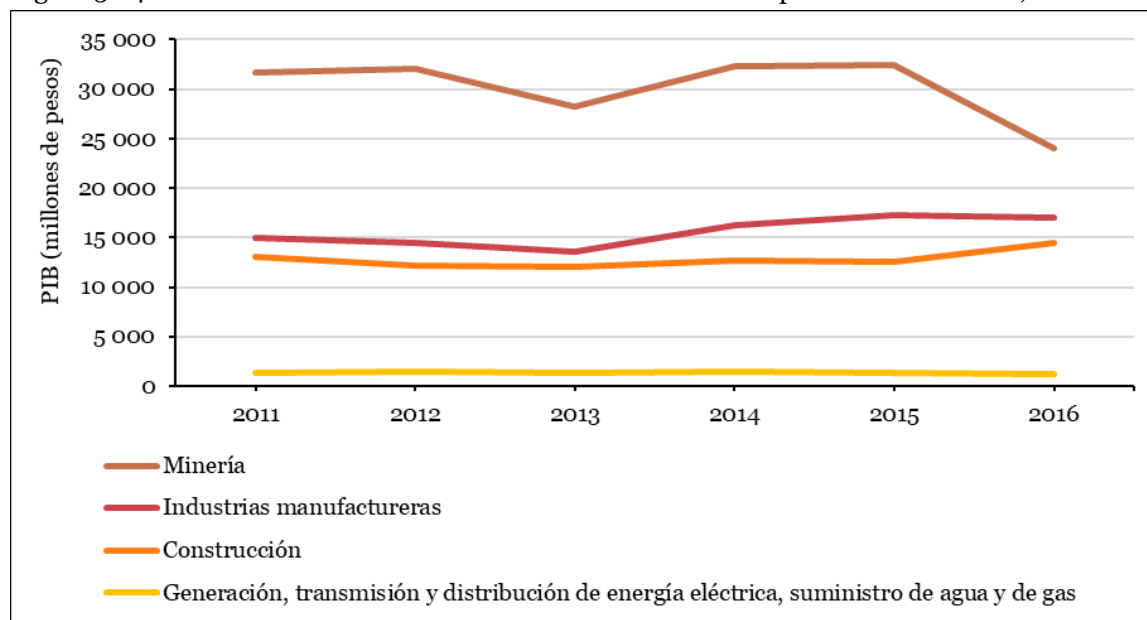
Figura 3.23. Evolución del PIB del estado de Zacatecas por sector económico, 2011-2016.



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).

Vale la pena echar un vistazo al comportamiento de las actividades secundarias por cada rama para el periodo de 2011 a 2016 (figura 3.24). Éstas son la minería, las industrias manufactureras, la construcción, así como la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas. Se observa que la minería es la rama que aportó más al PIB industrial y, por consiguiente, al PIB estatal, por ejemplo, en 2016 con 42.4 % y 15.4 %, respectivamente. Por eso, es evidente que la forma de la curva de evolución de la actividad minera es muy similar a la de las actividades secundarias en la figura anterior, y se aprecia que la minería experimentó una disminución significativa de 2015 a 2016. Las industrias manufactureras y la construcción se mantuvieron en niveles parecidos, mientras que la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas tuvo una participación muy baja en el PIB industrial y su comportamiento a lo largo del periodo fue estable. En 2016, aportaron al PIB industrial con el 30.0 %, 25.4 % y 2.2 %, respectivamente.

Figura 3.24. Evolución del PIB industrial del estado de Zacatecas por rama económica, 2011-2016.

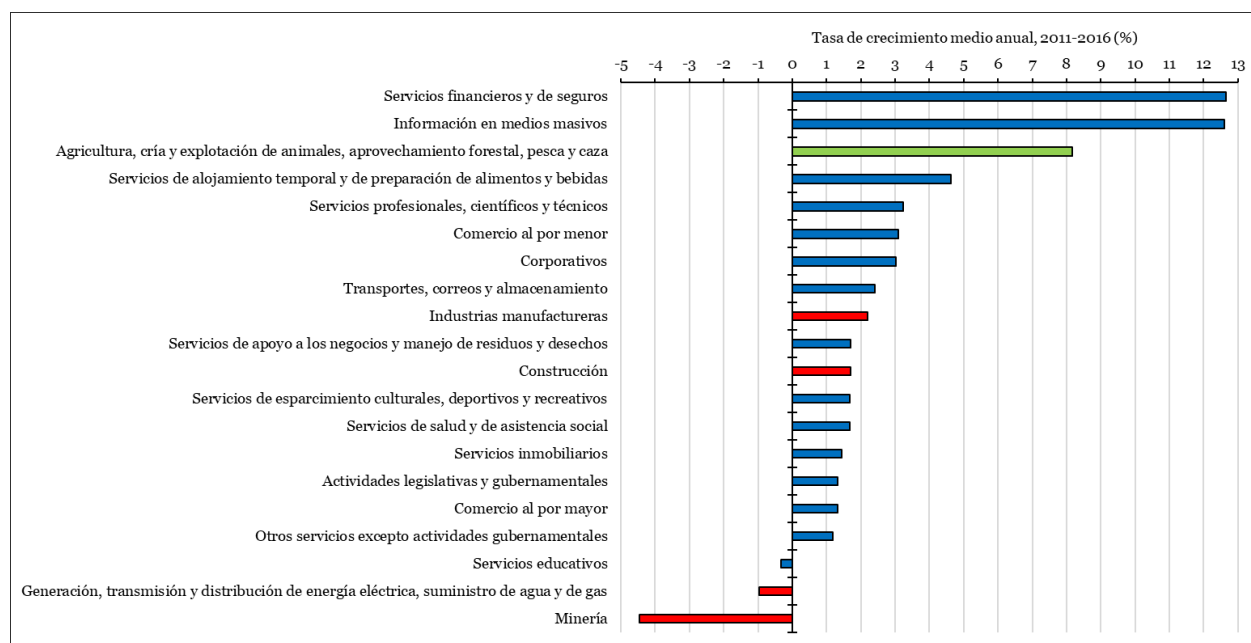


Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).

Parece interesante relativizar la reducción del PIB de la actividad minera con las demás ramas de todos los sectores económicos. En la figura 3.25 se nota que solo hay tres ramas que tuvieron una tendencia negativa. La minería mostró las pérdidas más graves; esto pudo ser la consecuencia de la demanda internacional decreciente, los precios de los minerales metálicos y las suspensiones temporales de actividad ocasionadas por los conflictos con las comunidades que mantuvieron a algunas minas totalmente paradas, como fue el caso en la unidad minera Peñasquito. Los servicios educativos son la única actividad del sector terciario que bajó su aportación al PIB estatal. Las actividades

primarias tuvieron un crecimiento considerable, que se puede comprender con el hecho de que aumentaron las superficies dedicadas a la agricultura y los bosques en el estado zacatecano, que fueron los resultados de los cálculos sobre el uso de suelo y vegetación. Los servicios financieros y de seguros, así como la información en medios masivos fueron las ramas con mayor crecimiento en el periodo dado.

Figura 3.25. Tasa de crecimiento medio anual del PIB del estado de Zacatecas por rama económica, 2011-2016.



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2018).

Los colores de las barras corresponden al color asignado al sector económico previamente.

Entonces, la minería es importante para el PIB estatal, pero lidió con inconstancias durante los últimos años. La volatilidad de los precios internacionales, la aleatoriedad de los yacimientos minerales y los paros laborales por las huelgas o los asuntos legales son tres razones de peso para entender los altos y bajos de la actividad minera. De acuerdo con el SGM (2018b, 16), “el Estado es tradicionalmente minero desde la época de la colonia” y “la minería en el estado de Zacatecas ha sido el pilar en el desarrollo económico” (SGM 2018b, 20). En la actualidad, la capital es la sede de la Subdirección de Minería y se estimó que el 31.6 % de la superficie estatal es concesionada a las empresas mineras (SGM 2018b, 11).

Al nivel municipal, se maneja la producción bruta total en lugar del PIB. La figura 3.26 sobre este indicador muestra cuatro municipios (Fresnillo, Calera, Mazapil y Zacatecas) con la mayor producción bruta total, tres de éstos sobre la franja diagonal del centro, aunque se encuentran varios municipios de esa región con menor producción; ello

se debe a que es allí en donde se ubican las principales unidades mineras del sector privado nacional y extranjero de la gran minería, dedicadas a la minería de metales preciosos (oro, plata) y a la de metales industriales (plomo, zinc y cobre). En contraste, el sur y suroeste se caracterizan por la ausencia de una producción alta, mientras que el norte y noreste muestra una imagen más heterogénea.

Debido a la preponderancia de las actividades terciarias a nivel estatal, la mayoría de la producción bruta total de los municipios se generó a partir del sector terciario, que incluye los servicios y el comercio. No obstante, se observa también una participación notable de las actividades secundarias, porque doce municipios (Calera, Mazapil, Guadalupe, Ojocaliente, Sombrerete, Chalchihuites, Miguel Auza, Tabasco, Pinos, Teúl de González Ortega, Pánuco y El Salvador) presentan un predominio del sector industrial. Debido al bajo valor agregado de los productos agropecuarios, la producción bruta total a nivel municipal es muy insignificante, aunque puede desempeñar un papel importante en cuanto a la población ocupada o la superficie de labor. El cuarto sector se puede entender como una agrupación de actividades económicas que no se incluyeron en los tres sectores tradicionales por cuestiones de confidencialidad. En efecto, cuatro municipios de carácter fuertemente minero en los que sobresalió ese sector son Fresnillo, Morelos, Concepción del Oro y Vetagrande. Fresnillo, que es el principal productor de plata a nivel mundial, tuvo la mayor producción bruta total, por lo que se puede asumir que se debió a la actividad minera, pero por razones de confidencialidad se clasificó en el sector sin valor informativo; lo mismo ocurre con Morelos, Concepción del Oro y Vetagrande que son municipios mineros.

Por último, el crecimiento de la producción bruta total se refiere al periodo de 2003 a 2013. Los municipios de Chalchihuites, Mazapil y Ojocaliente tuvieron los mayores incrementos; se debió al sector industrial y, de hecho, son territorios con actividad minera muy importante por la presencia de empresas grandes como *First Majestic*, *Newmont Gold* o *Frisco* y la minería como base de la economía municipal. En el caso de Chalchihuites, la extracción minera empezó en el periodo seleccionado, lo que puede explicar el crecimiento ejemplar. A pesar de que hay dos municipios con un decrecimiento de la producción bruta total, la gran mayoría de los que se ubican en la franja diagonal del centro tuvieron crecimientos altos por arriba del promedio nacional.

Si se analiza la actividad económica que más aporta a la producción bruta total (figura 3.27), se constata que 25 de los 58 municipios produjeron más a través del comercio al por menor. Las industrias manufactureras sobresalieron en once casos, los

sectores agrupados por el principio de confidencialidad en nueve, la minería en cuatro (Mazapil, Sombrerete, Chalchihuites y Pinos), el comercio al por mayor en tres al igual que los servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas, los transportes, correos y almacenamiento, en uno al igual que los servicios financieros y de seguros, así como los servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación.

Mientras que el mapa anterior muestra una alfombra de retazos, la figura 3.28 hace referencia en específico a la participación de la actividad minera en la producción bruta total del municipio. Se identifican once municipios (Mazapil, Chalchihuites, Morelos, Fresnillo, Sombrerete, Ojocaliente, Pinos, Vetagrande, Tlaltenango de Sánchez Román, Jerez y Zacatecas) del estado zacatecano en los cuales la actividad minera aporta de forma importante, regular o insignificante. Con excepción de Mazapil en el noreste y Tlaltenango de Sánchez Román en el sur, los demás municipios se ubican en la franja diagonal del centro.

En cuanto a la población ocupada (figura 3.29), los municipios de Zacatecas y Guadalupe son los que más oportunidades de empleo dieron a sus habitantes y los que registraron más participación de la población femenina en términos laborales. No obstante, la población ocupada femenina es siempre menor que la masculina, aunque la gran mayoría de los municipios tienen un predominio de mujeres en la población. La concepción del papel tradicional de la mujer y su acceso al mercado laboral han de ser posibles razones para ese resultado. La menor población desocupada relativa se encuentra en los municipios del noreste, mientras que la franja diagonal del centro presenta más lugares con habitantes sin empleo en relación con la población total.

En comparación con el mapa que representa la actividad predominante según la producción bruta total por municipio, la figura 3.30 muestra la rama económica en la que la mayor parte de la población trabajó, y el resultado es una imagen más homogénea. En 47 de los 58 municipios, que es el 81 %, los habitantes eran empleados sobre todo en el comercio al por menor. En cuatro casos, las industrias manufactureras superaron a las demás actividades, por delante de los sectores agrupados por el principio de confidencialidad con tres casos, la minería con dos (Mazapil y Chalchihuites), el comercio al por mayor, así como los servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas con uno. En total, en 35 de los 58 casos, la actividad económica más importante para la población ocupada de un municipio coincide con la de la producción

bruta total. Entonces, el comercio por menor engloba a mucha fuerza de trabajo, pero no tiene automáticamente la mayor producción en miles de pesos. Además, este tipo de comercio es una actividad alternativa de sobrevivencia para la población, de la que una parte considerable la ejecuta en la informalidad, y disminuye el desempleo.

La figura 3.31 con el tema de la participación de la minería en la cantidad de empleados en el municipio, presenta el mismo patrón espacial que su equivalente sobre la producción bruta total, pero se observa una disminución leve de la intensidad de los colores, ya que reduce la aportación de los trabajadores mineros al total de empleados en el municipio. A causa de los procesos automatizados, las unidades mineras requieren menor fuerza de trabajo que el comercio al por menor; asimismo, algunas profesiones tienen que ver con las unidades mineras, pero propiamente no son mineros, por ejemplo, los transportistas que conducen los camiones de carga con el material extraído.

Aunado a la producción bruta total, el volumen de la producción acumulada al nivel municipal para el periodo de 1988 a 2016 (figuras 3.32, 3.33, 3.34, 3.35 y 3.36) muestra los principales productores de plata, plomo, zinc, oro y cobre en el estado de Zacatecas. En esta entidad federativa se extraían también otros minerales metálicos, por ejemplo, el hierro y el manganeso, pero en cantidades bajas; en cambio, fue el primer productor del cadmio a nivel nacional (40.8 %). Cabe mencionar que la presencia de la minería no significa automáticamente un municipio de importancia minera. Más bien, su importancia radica en señalar en qué territorios se concentra. El cuadro 3.2 presenta de manera general a los municipios que más aportaron a la producción de los minerales metálicos seleccionados y, por ende, fomentaron el mayor valor de la minería en el estado de Zacatecas. Con referencia a la plata, Fresnillo no predominó solamente a nivel estatal o nacional, sino también en todo el mundo. A pesar de ello, Mazapil fue el municipio con una participación considerable en los seis minerales, entre los que destacó el oro. Por lo tanto, las unidades mineras de Fresnillo (Proaño-Saucito) y Mazapil (Peñasquito) lograron la producción bruta total más importante de la minería a partir de la extracción de los metales preciosos, que son más raros y exclusivos, por lo que generan mayores ganancias que los demás municipios.



Cuadro 3.2. Principales municipios con producción minera metálica del estado de Zacatecas, 1988-2016.

Municipio	Participación del municipio al volumen de la producción minera con respecto al total estatal (%)					
	Plata	Plomo	Zinc	Oro	Cobre	Cadmio
Fresnillo	54.5	15.2	8.4	16.2	*	*
Mazapil	15.7	36.9	38.5	59.4	19.7	11.6
Sombrerete	10.0	11.8	23.0	*	47.1	36.1
Chalchihuites	7.1	*	*	*	*	*
Noria de Ángeles	6.4	20.4	8.1	*	*	19.9
Morelos	*	9.8	19.4	*	26.1	30.9
Ojocaliente	*	*	*	18.6	*	-

Fuente: Elaboración propia con base en SGM (2019).

\* Municipio con producción del mineral metálico por debajo de 5 % del total estatal.

- Municipio sin producción del mineral metálico.

En resumen, se constata la importancia de la minería, sobre todo en la franja diagonal del centro, que recorre los municipios de Chalchihuites, Sombrerete, Fresnillo, Morelos, Zacatecas y Vetagrande. A pesar de la inestabilidad que tiene la actividad minera por naturaleza a causa de su aleatoriedad por razones económicas, naturales, así como por motivos de conflictividad socioterritorial de algunos proyectos mineros, posibilita la oferta de empleo y la aportación de recursos económicos al gobierno estatal y a los municipios.

Figura 3.26. Producción bruta total en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.

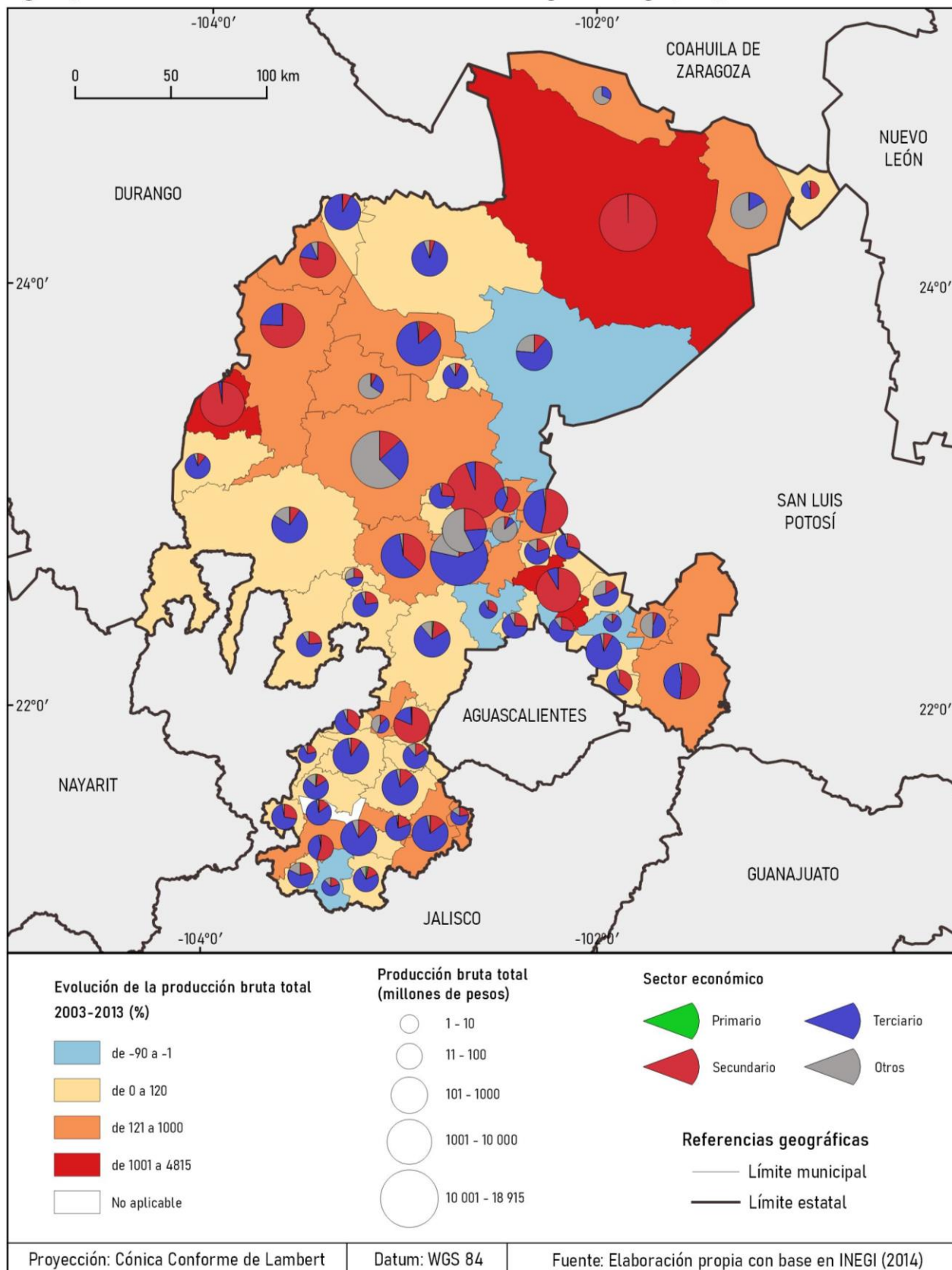


Figura 3.27. Principal actividad según la producción bruta total en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.

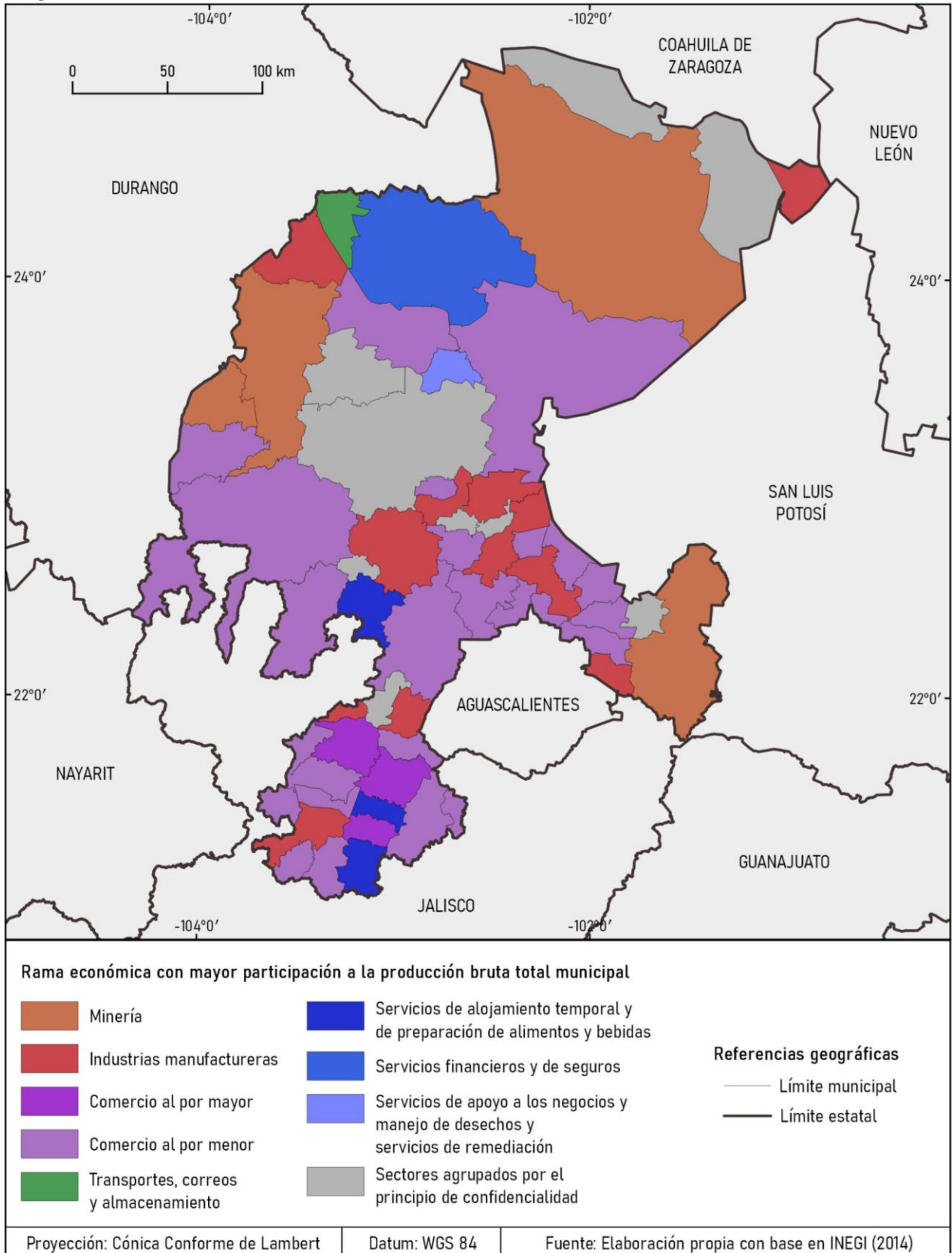


Figura 3.28. Producción bruta total de la actividad minera en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.

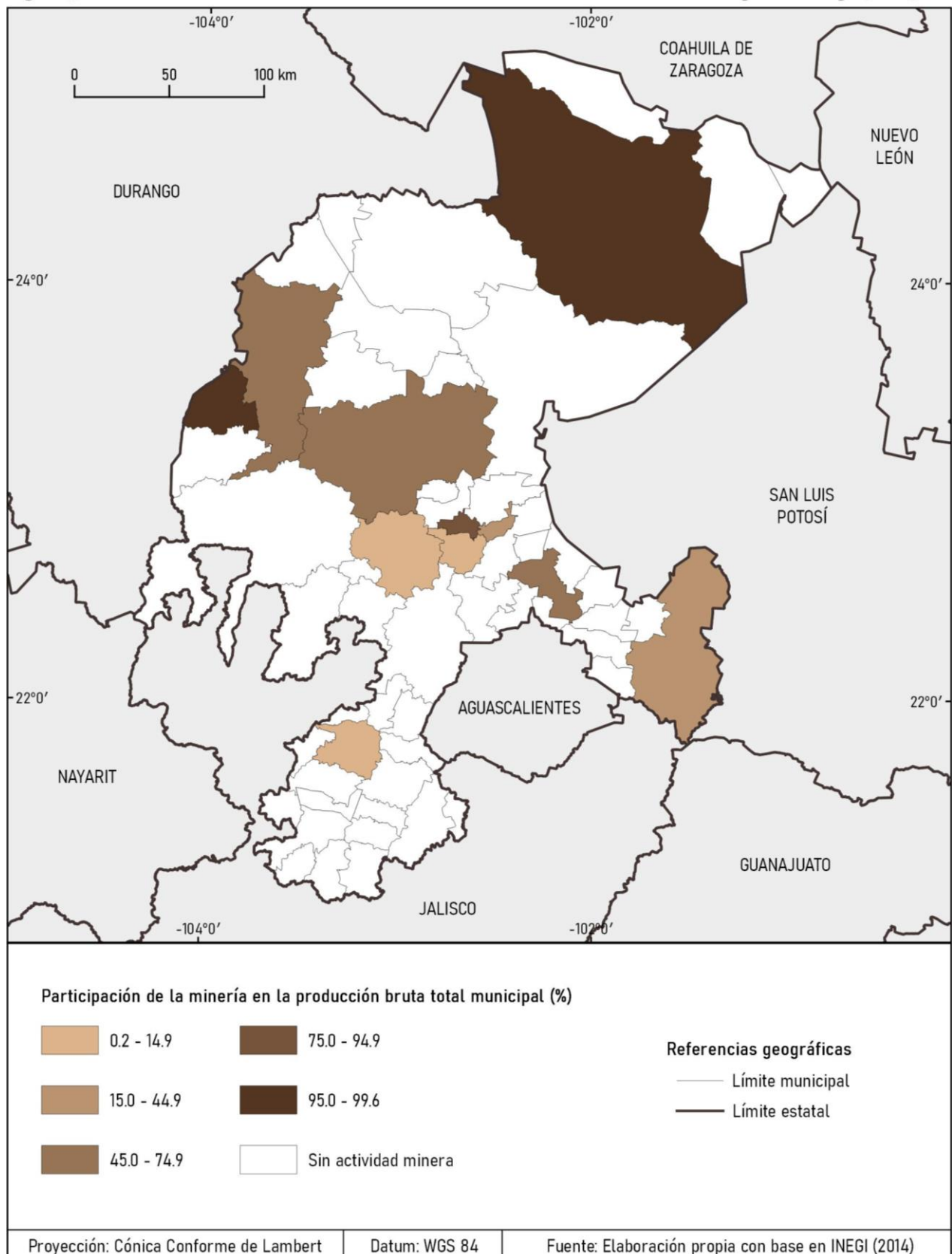


Figura 3.29. Población ocupada y desocupada en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.

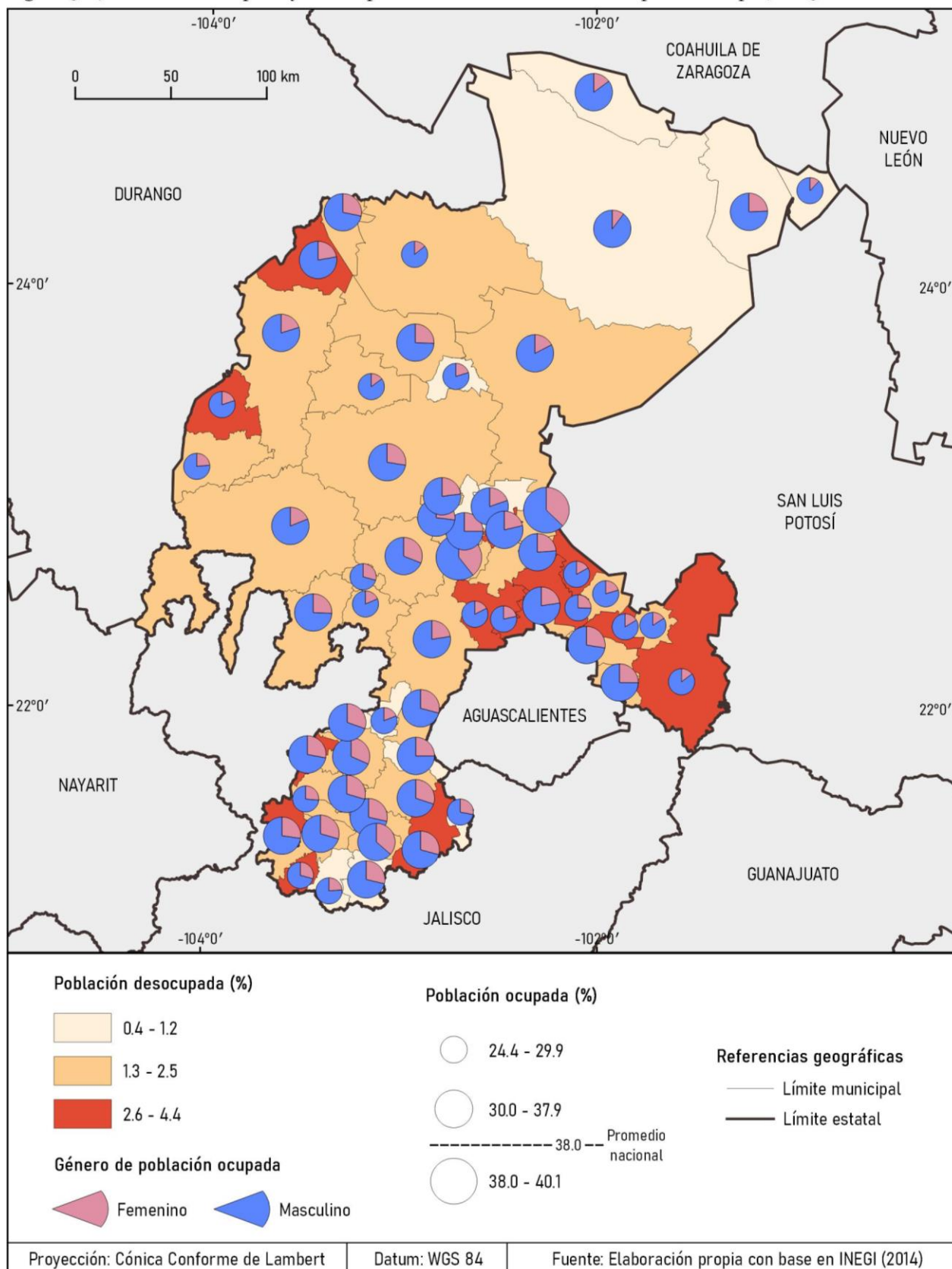


Figura 3.30. Principal actividad según la población ocupada en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.

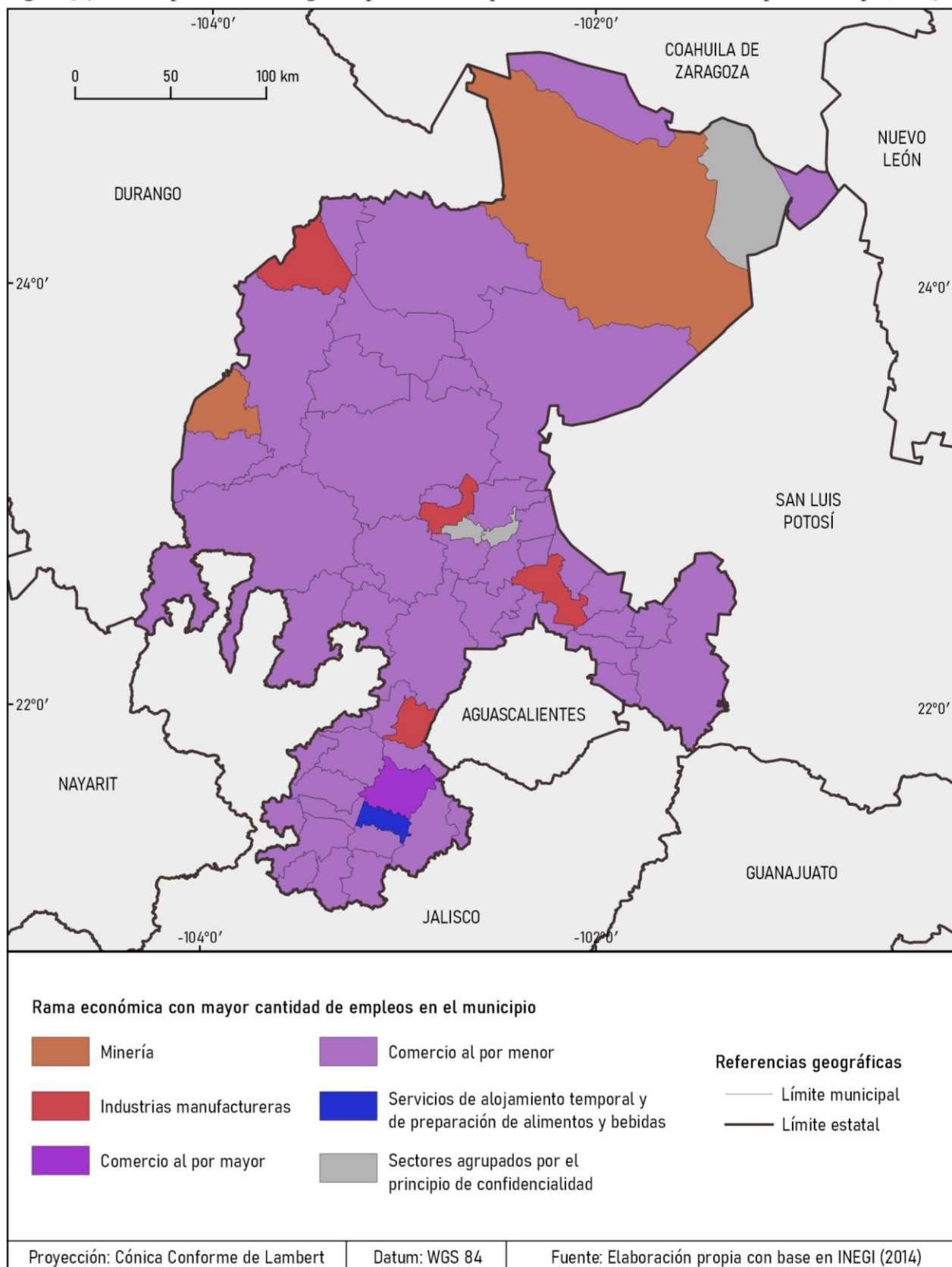


Figura 3.31. Población ocupada en la actividad minera en el estado de Zacatecas por municipio, 2013.

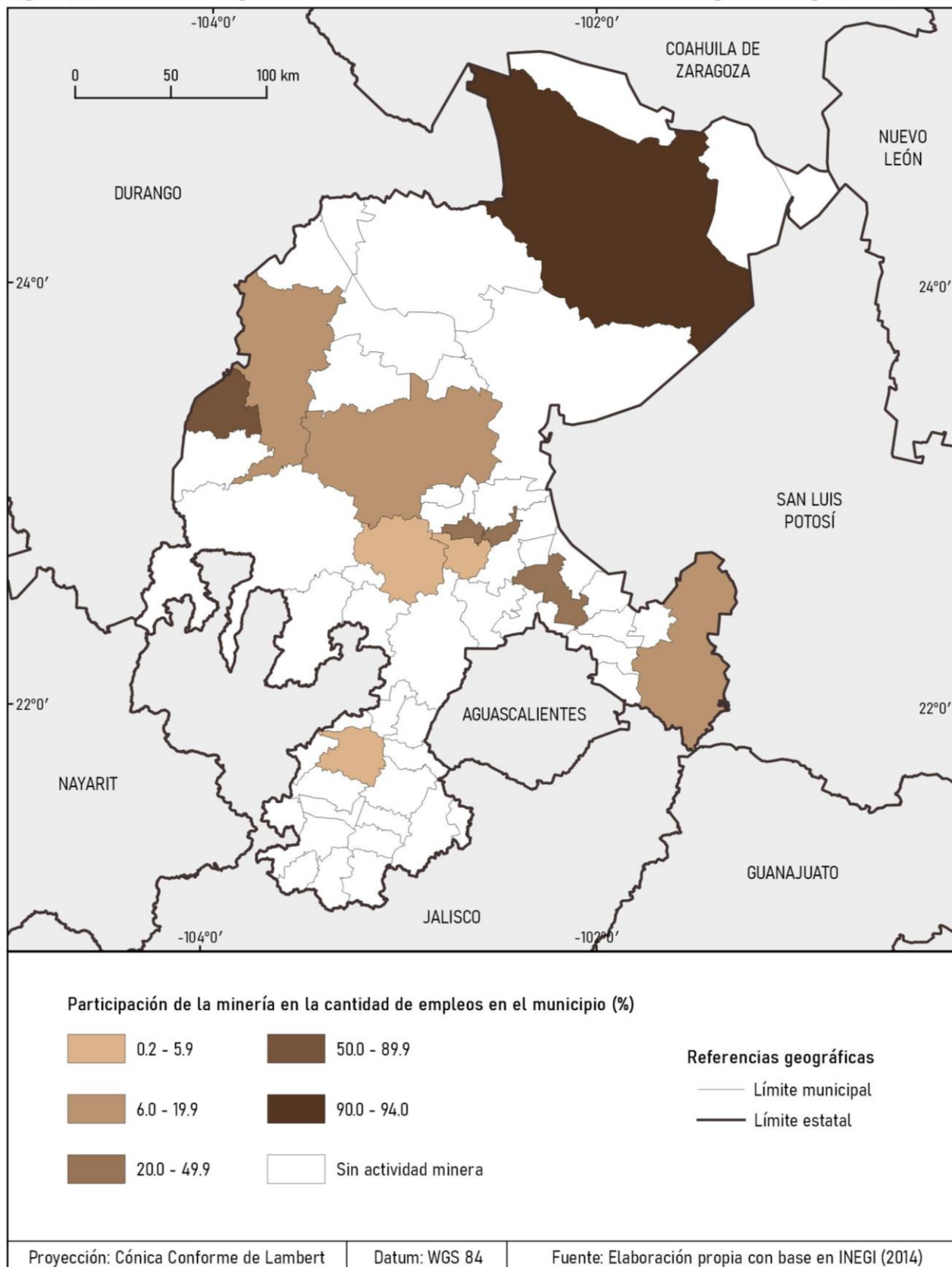


Figura 3.32. Oro: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.

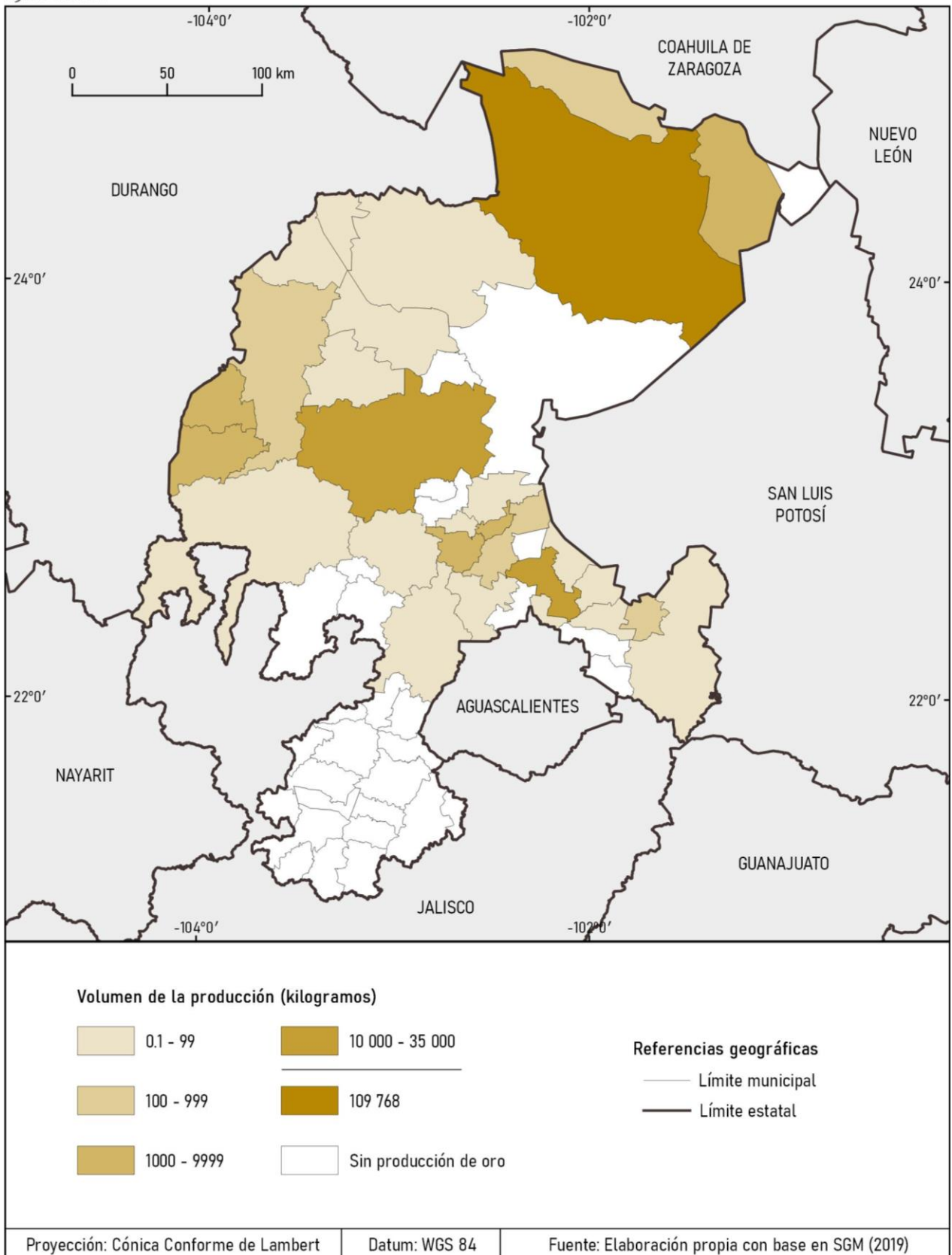




Figura 3.33. Plata: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.

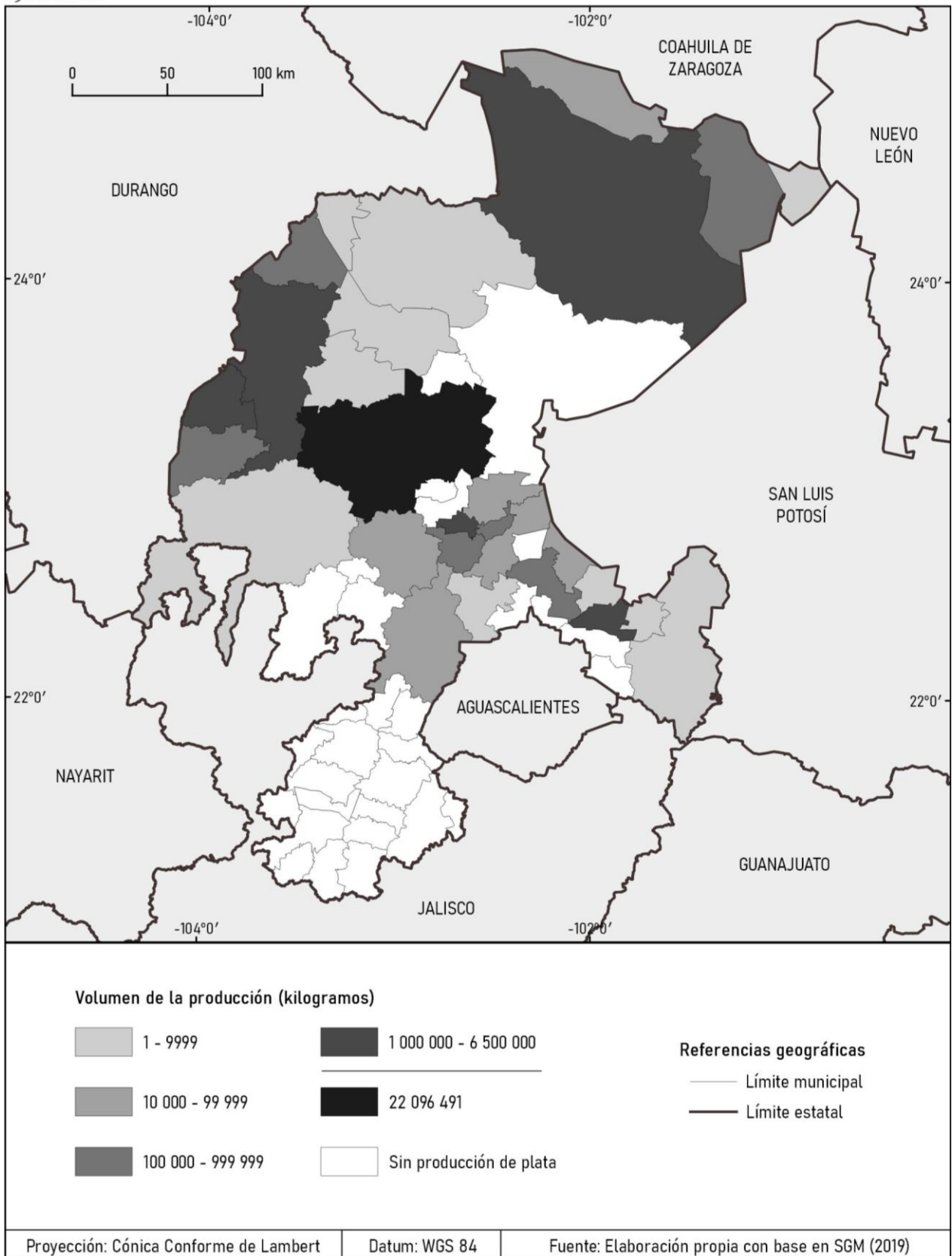


Figura 3.34. Plomo: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.

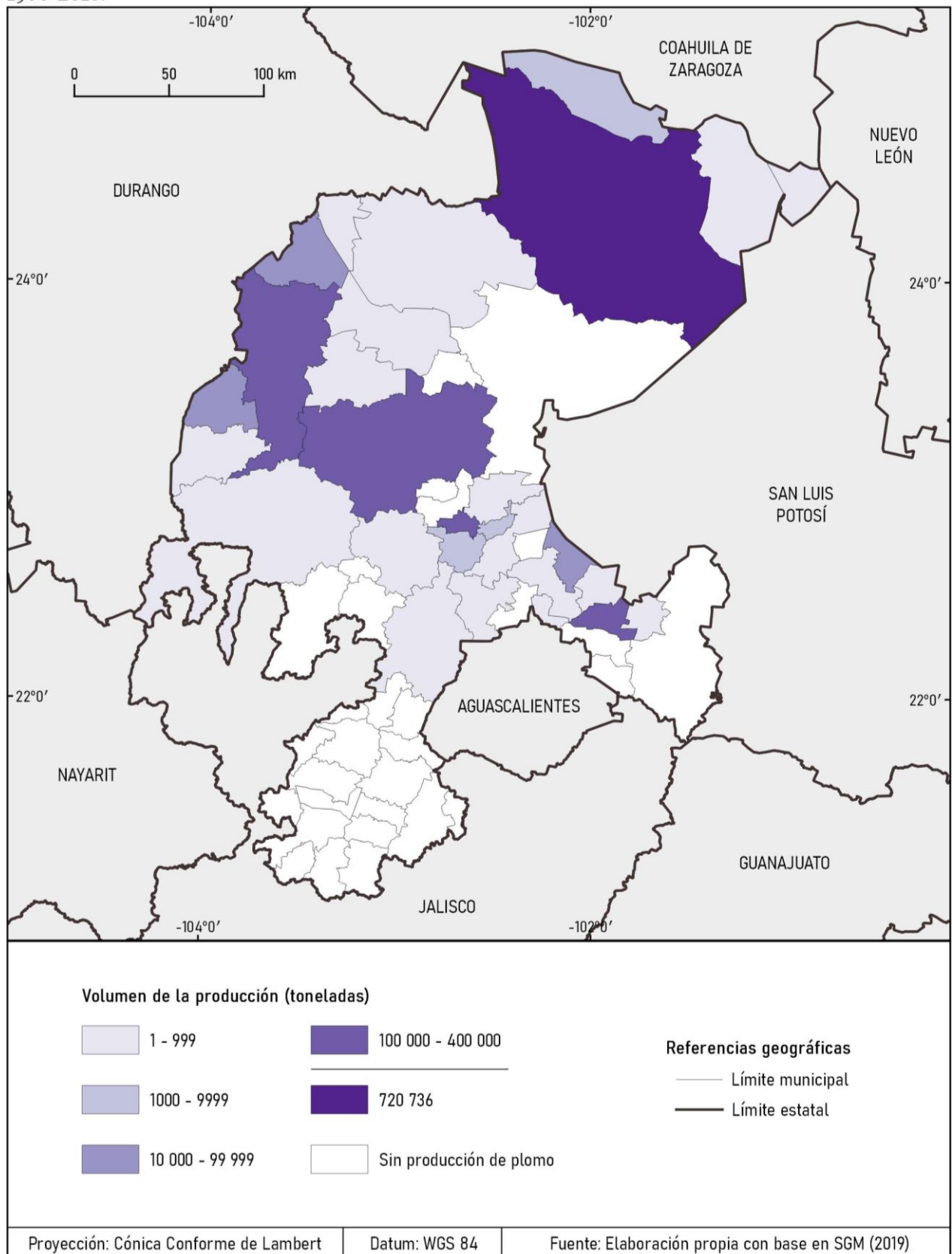


Figura 3.35. Zinc: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.

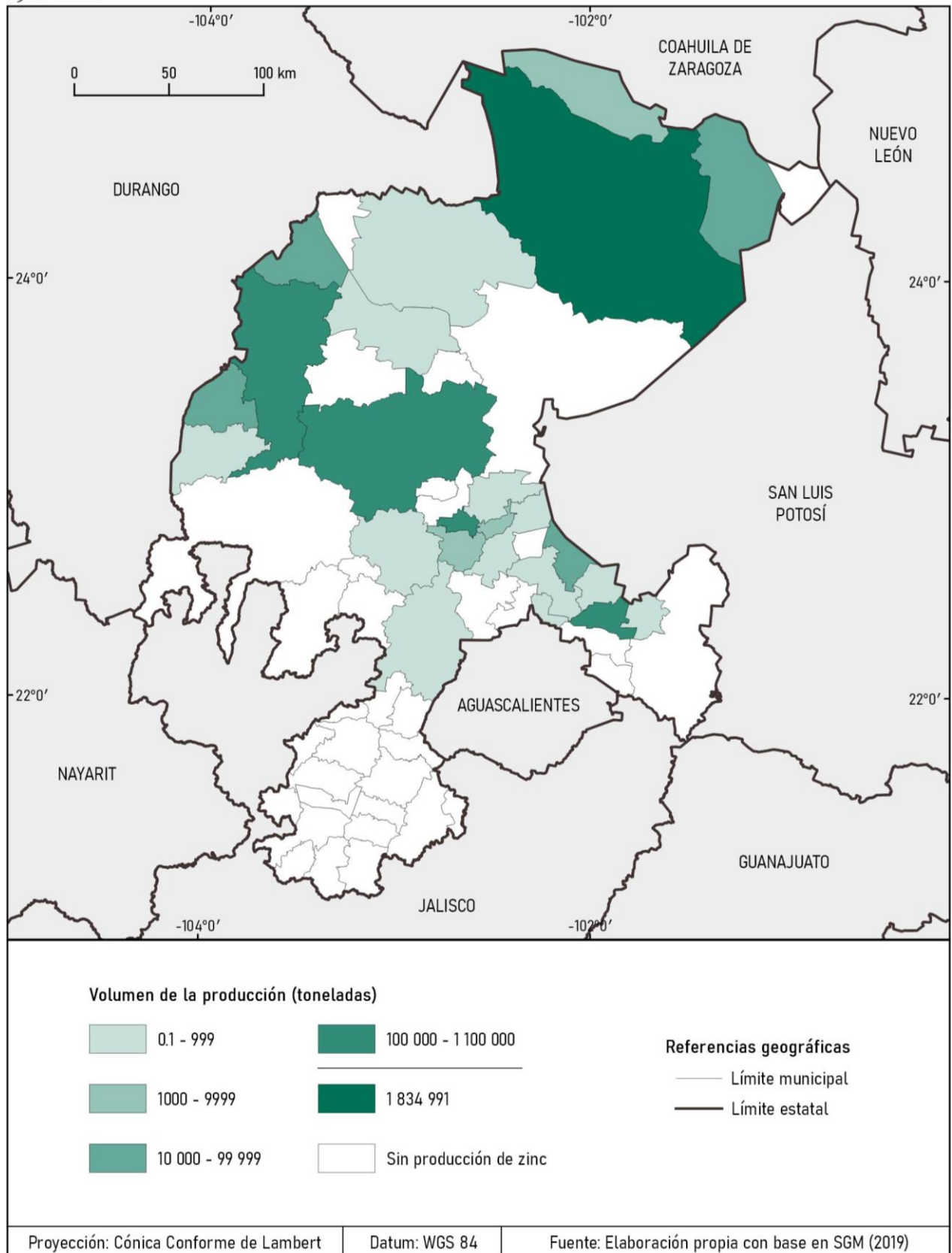
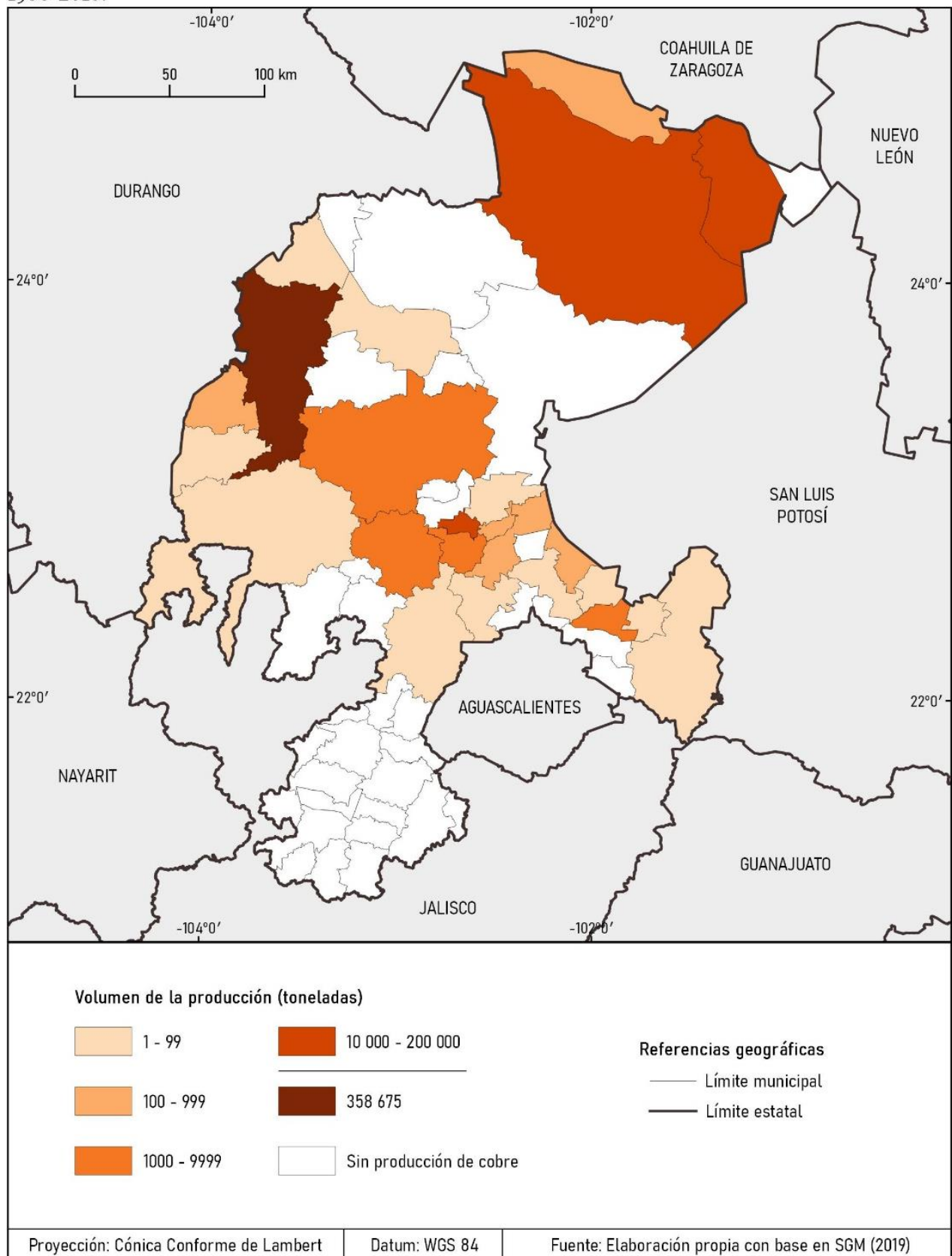


Figura 3.36. Cobre: Volumen de la producción acumulada en el estado de Zacatecas por municipio, 1988-2016.



## **Capítulo 4**

# **Propuesta de los sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas**

Este capítulo presenta los resultados de la investigación sobre la aptitud que tienen los depósitos de jales de las unidades mineras ubicadas en el estado de Zacatecas para la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes. Primeramente, se localizan las unidades mineras activas en el estado de Zacatecas y se representan con sus características principales. A continuación, los conocimientos obtenidos mediante las visitas realizadas a algunas unidades mineras como objetivo del trabajo de campo sirven para complementar el estudio de gabinete y completar el análisis de su aptitud con respecto a la propuesta. Para orientar la toma de decisiones a favor de las plantas fotovoltaicas flotantes, se emplea el análisis FODA en el que se destacan las ventajas que tienen éstas en comparación con las terrestres, pero también la conveniencia de los depósitos de jales como sitios adecuados para la instalación de tales construcciones; por el contrario, la exposición de barreras y limitantes posibles y probables permite un estudio cabal e imparcial. Finalmente, se estima el potencial de generación energética de algunas unidades mineras de manera hipotética por medio de los sistemas fotovoltaicos flotantes colocados en los depósitos de jales.




### **4.1. Distribución geográfica de las unidades mineras activas**

La minería metálica del estado zacatecano se concentra en algunos de sus municipios, por eso, es interesante mostrar de forma indicativa la distribución de las unidades mineras en operación, así como su capacidad productiva, los minerales que se extraen, el tipo de beneficio y el origen del concesionario (figura 4.1). Esta representación contribuye a identificar las unidades mineras más propensas al aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica desde los depósitos de jales. Mientras que se descartaron las que no están operando ni las dedicadas a la extracción de minerales no metálicos, el enfoque se centró en las unidades mineras metálicas con mayor producción con respecto al volumen y al valor. Por una parte, la mayor cantidad de volumen extraído significa

lógicamente una mayor superficie del depósito de jales, puesto que se generan más residuos mineros y, por ende, la instalación de una planta fotovoltaica flotante con mayor extensión. Desgraciadamente, la información recopilada *in situ* es escasa en cuanto al área ocupada por los depósitos de jales, por lo que no se pudo confirmar tal afirmación. Por otra parte, el valor de la producción de los minerales metálicos producidos por las unidades mineras zacatecanas, en especial de los metales preciosos, rebasa al de los minerales no metálicos, por lo que aumenta notablemente su importancia en el mercado internacional. Asimismo, las mayores inversiones y el mayor capital disponibles por parte de estas unidades mineras posibilitan el gasto considerable de un sistema fotovoltaico flotante.

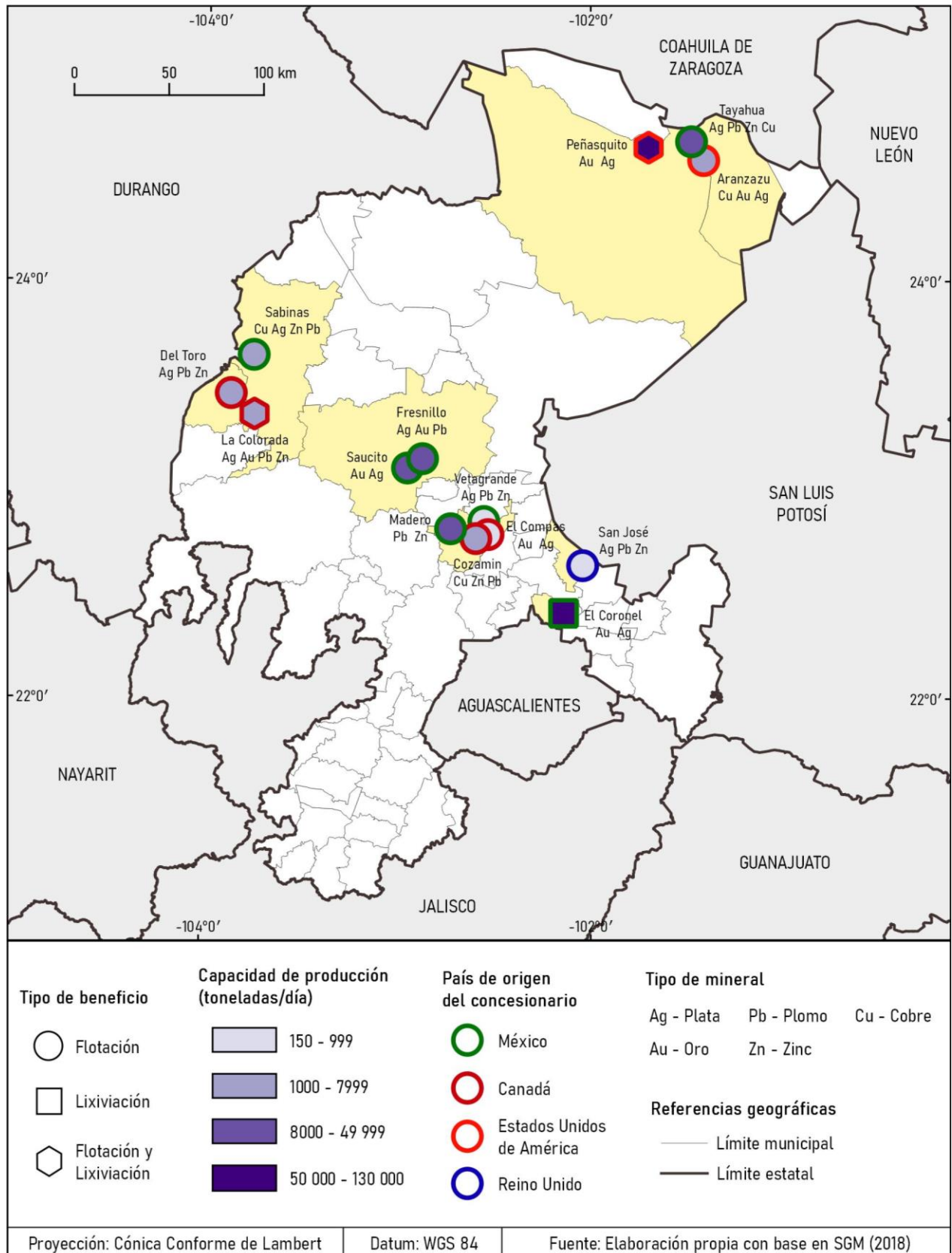
Con el propósito de evaluar la distribución espacial de las unidades mineras desde un punto de vista objetivo, se empleó el Índice Rn (o Clark-Evans), que “permite cuantificar el grado de concentración” de un fenómeno en un territorio determinado (Gasca Zamora 2018). Entonces, se tomaron en cuenta catorce unidades mineras, el promedio de las distancias más cortas entre cada una, así como la superficie de la entidad federativa. El resultado de 0.4 significa que las unidades mineras en el estado zacatecano se tienden a agrupar (cuadro 4.1), lo que se explica a partir de las condiciones geológicas y, por consiguiente, la formación de los yacimientos minerales. En otras palabras, la minería es una actividad económica que depende de las propiedades físico-geográficas, por lo que no se puede efectuar en cualquier lugar ni desarrollar equitativamente en un territorio. La interpretación de la cartografía, que revela la presencia de una franja transversal en el centro y un nodo en el norte de la entidad federativa, y el cálculo matemático confirmaron de manera conjunta la concentración de las unidades mineras en el estado de Zacatecas.

Cuadro 4.1. Interpretación del Índice Rn.

Representación gráfica			
Representación numérica	0	1	2.15
Evaluación	Distancia mínima	Distancia aleatoria/dispersa	Distancia regular

Fuente: Elaboración propia con base en Gasca Zamora (2018).

Figura 4.1. Unidades mineras activas con producción de minerales metálicos en el estado de Zacatecas, 2019.



Cabe mencionar que el mapa elaborado es una aproximación a la realidad, porque algunos datos no están actualizados o correctamente registrados por las fuentes oficiales. Por ejemplo, el SGM (2018b 23, 29) indicó que en la unidad minera de Vetagrande se extraen y procesan oro, plata y plomo, aunque la visita a sus instalaciones reveló que los minerales explotados son la plata, el plomo y el zinc. Asimismo, el volumen de la producción registrado es casi la mitad de lo que señalaron los responsables en el lugar. Con respecto a los métodos de concentración de los minerales en las plantas de beneficio, se constata el uso predominante de la flotación. Este método emplea comúnmente varias sustancias como reactivos químicos para separar los minerales deseados, por ejemplo, la plata, el plomo o el zinc, de la ganga, que es el material que no se busca aprovechar. Las dos unidades mineras con mayor capacidad diaria de producción, Peñasquito y El Coronel aplican el método de lixiviación a base de cianuro de sodio, en el cual ocurre una transformación fisicoquímica del mineral, y se utiliza para separar los metales preciosos (el oro, la plata) de los demás. De todos modos, el uso de reactivos químicos es ineludible y los impactos ambientales en el entorno y las afectaciones resultantes en la salud humana inevitables. En cuanto al origen del concesionario, hay un equilibrio entre las inversiones nacionales e internacionales, ya que la mitad de las unidades mineras son propiedad de empresarios mexicanos, mientras que la otra mitad pertenecen a empresas extranjeras. Entre éstas, destacan los inversionistas canadienses por delante de los estadounidenses y uno más es originario del Reino Unido.

## **4.2. Resultados del trabajo en campo**

Del 6 al 17 de octubre de 2019 se realizó un recorrido por varias unidades mineras en el estado de Zacatecas con el propósito de identificar la aptitud de los depósitos de jales para implementar plantas fotovoltaicas flotantes con fines de generación eléctrica. Algunas de las unidades mineras se encuentran relativamente lejanas, por lo que las que se visitaron fueron seleccionadas en cuanto a su importancia productiva, conflictos sociales existentes por el cuidado del ambiente o de manera logística. Por medio del correo electrónico y/o teléfono se contactó a los responsables para pedir una visita guiada. La falta de actualización de la base de datos proporcionada por la Subsecretaría de Minas o los datos en las páginas de web oficiales de las empresas explica que solamente el 15 % de las solicitudes de visitas realizadas a distancia fueron atendidas. Al final, se lograron obtener los permisos para visitar las unidades mineras de Fresnillo, Saucito, Del Toro y



Vetagrande (cuadro 4.2). Las visitas se caracterizaron por entrevistas con responsables de diferentes ámbitos, por ejemplo, ingenieros de minas y metalurgia, geofísicos, geológicos o personal administrativo, y la exhibición de las instalaciones, aunque con algunas restricciones. Todos los datos de esta sección que se exponen en adelante son los resultados de las conservaciones con el personal cualificado.

Cuadro 4.2. Resumen de la planeación de las visitas guiadas en las unidades mineras.

Unidad minera	Toma de contacto por correo electrónico y/o teléfono	Respuesta del responsable de unidad minera	Toma de contacto directo en el lugar	Confirmación de visita	Negativa de visita	Anotaciones
Peñasquito	✓	✓	✗	✗	✓	Rechazo de la visita por cierre temporal
El Coronel	✓	✗	✗	✗	✗	No considerado por falta de respuesta
Fresnillo	✓	✗	✓	✓	✗	Preferencia por visita guiada a la Unidad Saucito por parte de la empresa; recorrido general en superficie por algunas áreas
Francisco I. Madero	✓	✗	✓	✗	✗	Proceso de solicitud largo, sin respuesta
Saucito	✓	✗	✓	✓	✗	Confirmación rápida
Tayahua	✗	✗	✗	✗	✗	No considerado por ubicación
Cozamin	✓	✗	✓	✗	✓	Solicitudes múltiples por teléfono, dificultad para contactar a directivos de la empresa
Sabinas	✓	✗	✗	✗	✗	No considerado por falta de respuesta
Del Toro	✓	✓	✗	✓	✗	Confirmación telefónica
La Colorada	✗	✗	✗	✗	✗	No considerado por conflicto con la comunidad
Vetagrande	✓	✗	✓	✓	✗	Toma de contacto múltiple por teléfono hasta confirmación de visita
Besmer	✗	✗	✗	✗	✗	No considerado por baja producción
El Compas	✗	✗	✓	✗	✓	Rechazo de la visita por inspección de la instalación por parte de directivos

Fuente: Elaboración propia. Los ganchillos verdes significan 'sí', las cruces rojas 'no'.

En el estado de Zacatecas, la empresa *Fresnillo plc* opera las unidades de Fresnillo y Saucito, esta última fue confirmada para la visita guiada, aunque también se realizó un recorrido de superficie en la unidad de Fresnillo durante el cual se pudieron observar algunos beneficios proporcionados por la empresa. La entrevista reveló que a ambas unidades mineras se les han otorgado diversos certificados, entre ellos el de ‘Industria Limpia’. La PROFEPA (2019) indicó que este certificado garantiza procesos más eficientes en los cuales se disminuye la demanda de agua, la energía, así como la acumulación excesiva de residuos. Asimismo, se promueven programas para evitar accidentes que afectan negativamente el ambiente.

Con respecto a las medidas realizadas para el cuidado del ambiente, la empresa construyó dos plantas de tratamiento de aguas negras con la capacidad de procesar 150 y 70 litros por segundo. En dichas plantas se trata el 35 % del agua derivada de los procesos mineros y de beneficio para volver a ser utilizada en los mismos, pero también el 60 % de las aguas negras provenientes de la ciudad. *Fresnillo plc* donó 40 000 árboles para la comunidad y plantó 30 000 árboles en la unidad minera Fresnillo, sobre todo en el parque ecológico creado en los terrenos antes ocupados por depósitos de jales abandonados. La decisión de convertirlos en un área verde fue para contrarrestar la contaminación de los residuos mineros en las zonas aledañas, principalmente por el polvo ocasionado por el viento. Por último, la colaboración con la PROFEPA posibilitó la integración de una Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA), en la cual se albergan 150 animales de 32 especies. Las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran tres ejemplos de las acciones de recuperación ambiental realizadas por la empresa *Fresnillo plc* que se observaron durante la visita guiada de la unidad minera de Saucito.

Figura 4.2. Parque ecológico ‘Los Jales’ en Fresnillo, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Figura 4.3. Instalación de paneles solares en el techo del estadio de fútbol en Fresnillo, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Figura 4.4. Banca fabricada con material reciclado en la UMA en Fresnillo, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Con referencia a los procesos mineros que se realizan en la unidad minera de Saucito, se pueden destacar algunas características. El mineral extraído de la mina subterránea se transporta mediante una banda desde el tiro hasta un punto, en el cual se acumula; ahí se encuentra dentro de un domo para evitar la dispersión del polvo en la atmósfera. Después de una serie de fases de trituración para de ordenar las sustancias de acuerdo con su tamaño (fino, grueso, muy grueso), en la planta de beneficio se lleva a cabo la molienda y el proceso de flotación. En total, hay cuatro molinos que preparan el material para concentrar los minerales deseados. A causa de su operación las 24 horas, se afirmó que éste es uno de los procesos con mayor consumo de energía dentro de la unidad minera. Las fases que se realizan dentro de la planta de beneficio son altamente automatizadas; hay una sala de control con pantallas grandes que permiten la vigilancia del proceso de flotación mediante cámaras. La aplicación de algunos compuestos químicos precipita el

fierro, porque éste no se quiere recuperar como tal. Sin embargo, los residuos minerales con contenido de fierro se envían a la planta de lixiviación que se ubica al lado, para la recuperación del oro que va asociado al fierro.

Esta planta es todavía una novedad, ya que se busca el beneficio de un mineral cuyos valores anteriormente no eran recuperables con la tecnología existente, pero ahora ello se ha logrado mediante el empleo de compuestos de cianuro. Dos molinos verticales procesan 600 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) por hora. Los residuos de ese proceso requieren un tratamiento para almacenarlos en los depósitos de jales. Por desgracia, no fue posible visitarlos, pero la información con respecto a los depósitos de jales se compartió por medio de una llamada por teléfono. La construcción se conforma de cuatro celdas con bordes intermedios y una superficie total de 170 ha. Mientras que las primeras dos celdas ya no operan, para las otras dos se asume una vida útil de unos diez años todavía. Las medidas planeadas para la etapa postoperatoria de los depósitos de jales contemplan la reforestación para aprovechar el terreno ocupado por éstos. La entrevista comprobó que hay un sistema de circuito cerrado, lo que implica la circulación del agua con residuos desde la planta de beneficio hasta los depósitos de jales y nuevamente se recupera para transportarla a las plantas de tratamiento para reutilizar el agua en el proceso de beneficio. Asimismo, se confirmó que de vez en cuando se observaron patos nadando en los depósitos de jales.

Por último, resulta interesante que la CFE otorga descuentos en el costo de energía eléctrica para la empresa. Esto se debe a que *Fresnillo plc* pertenece al Grupo Baillères que dispone de instalaciones eólicas e hidroeléctricas y la electricidad producida a partir de éstas beneficia a la CFE. Las máquinas nunca se apagan para ahorrar energía, por lo que el consumo de electricidad es alto en Saucito. Pero si se tiene que encender un aparato, su arranque se evita a ciertas horas por el costo de electricidad más alto.

La unidad minera Del Toro ubicada en el municipio Chalchihuites, que se constituye de tres minas subterráneas (Dolores, Perseverancia y San Juan) y una planta de beneficio, es propiedad de la empresa canadiense *First Majestic*, que empezó a explorar en 2008 y a operar en 2012. Mientras que esta unidad es operada completamente por mexicanos, los puestos clave están ocupados por canadienses. La plata y el plomo son los minerales que se explotan; la vida útil de las minas en este momento se estimó en unos dos años y medio considerando las reservas probadas de 700 000 toneladas. Pero los responsables mencionaron que actualmente se está realizando una exploración agresiva por parte de la empresa para incrementar las reservas.

Aunque la capacidad instalada es de 2000 toneladas al día, solamente se procesan 350 toneladas al día a causa de una reestructuración que está en proceso. Con respecto al consumo de energía en la unidad minera, se indicó que antes se necesitaban diariamente 20 000 litros de diésel para alimentar a los generadores de electricidad. En la actualidad, el 100 % de la demanda energética se satisface a través de la red eléctrica de la CFE. Esto es calificado por la empresa como parte de su responsabilidad social, porque, según los entrevistados, la empresa realizó la construcción de la línea de alta tensión, pues anteriormente, los apagones por falta de energía eran frecuentes.

Igualmente, la empresa promovió el progreso de la infraestructura social de la localidad de Chalchihuites con la facilitación del internet y la construcción de una casa comunitaria, en la cual se exponen piezas de valor cultural elaboradas por artesanos locales y talleres gratuitos para los habitantes de la comunidad.

En cuanto a la preservación del ambiente, la unidad minera cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, que, junto con el depósito de jales construido con la técnica de pastas para evitar la contaminación del aire por polvos, ayudaron a obtener el certificado de ‘Industria Limpia’ por parte de la PROFEPA. Este tipo del manejo de residuos se muestra en la figura 4.5. Mientras que los depósitos de jales con agua y los de pastas requieren los mismos requisitos y medidas, estos últimos evitan el peligro de derrames. Pero la falta de agua, considerando los objetivos y alcances de este proyecto, sería un impedimento para la instalación de un sistema fotovoltaico flotante; no obstante, se podría analizar la factibilidad de una planta terrestre. Cabe aclarar que hay dos depósitos de jales en la unidad minera Del Toro. El primero tiene una extensión de 15 ha y se va a cerrar al término de su vida útil que es de nueve años. El plan de abandono incluye revestir con material estéril la parte superficial y después la plantación de vegetación típica del lugar, por ejemplo, el mezquite. El otro depósito de jales está en construcción y tendrá una superficie de 54 ha con una vida útil estimada de 25 años.

Figura 4.5. Depósito de jales seco en la unidad minera Del Toro en Chalchihuites, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

También se visitó la unidad minera Vetagrande, que se gestiona bajo el nombre de Contracuña y Santa Cruz Silver es la empresa detrás de las operaciones mineras. Éstas se realizan en las minas subterráneas de García y Armados, en las cuales se extraen plomo y zinc, así como plata, respectivamente. Actualmente, se explotan 782 toneladas de concentrado de minerales al mes. Para el futuro, dentro de dos años, se prevé alcanzar la producción de 2000 toneladas al día y dentro de seis años se pronostica el procesamiento de 4000 a 8000 toneladas al día. El beneficio de los minerales se lleva a cabo en una planta que cuenta con instalaciones de trituración (figura 4.6) y de molienda para la obtención de finos; para la molienda se cuenta con cuatro molinos y para realizar la concentración existen cuatro tanques de flotación. La molienda (figura 4.7) sirve para reducir las partículas del mineral a un tamaño adecuado para el proceso de flotación, por lo que los molinos llevan la carga mezclada con el agua, a la cual posteriormente se le añaden los reactivos químicos. Mientras que las partículas más grandes vuelven a la remolienda, el otro material pasa al proceso de flotación, en el cual se recuperan los minerales valiosos: plata, plomo y zinc.

A diferencia de las instalaciones modernas y equipadas con tecnología avanzada de la unidad minera Saucito, Vetagrande opera con equipo aparentemente viejo y con métodos sencillos. Por ejemplo, la comprobación de la concentración de los minerales durante la flotación se realiza por medio de la dentadura -una técnica manual- que, de acuerdo con el entrevistado, solamente una minoría de los obreros mineros domina, sobre todo aquellos con edad avanzada. El fierro no se desea explotar por su impureza, por lo que se separa de los minerales de interés y se envía a los depósitos de jales.

Actualmente, éstos se constituyen de tres construcciones: la primera estaba fuera de servicio, la segunda está en operación y la tercera se encuentra en trámite para su construcción y está proyectada para utilizar la técnica de pastas. No se pudo obtener información sobre la extensión de cada uno de los depósitos de jales, pero se señaló que su vida útil es de 20 años, o más si se gestionan adecuadamente. El depósito de jales que opera tiene una leve inclinación para que se acumule el agua donde está la tubería para recircular el agua recuperada. Todos los minerales que no tienen utilidad, así como el fierro, se depositan dentro del vaso de almacenamiento, pero también pueden formar parte de las paredes. El entrevistado reportó que este depósito nunca ha tenido derrames y que se ha observado una disminución de las lluvias últimamente. Esto es importante, porque afecta directamente la cantidad de agua disponible. *Grosso modo*, el 80 % del agua en los depósitos de jales se recircula (figura 4.8), en tanto que el resto se evapora o se

infiltra. En las paredes del depósito de jales visitado se apreció el crecimiento de plantas pequeñas. Igualmente, se confirmó la presencia de patos nadando en el agua del depósito y aves en las cercanías.

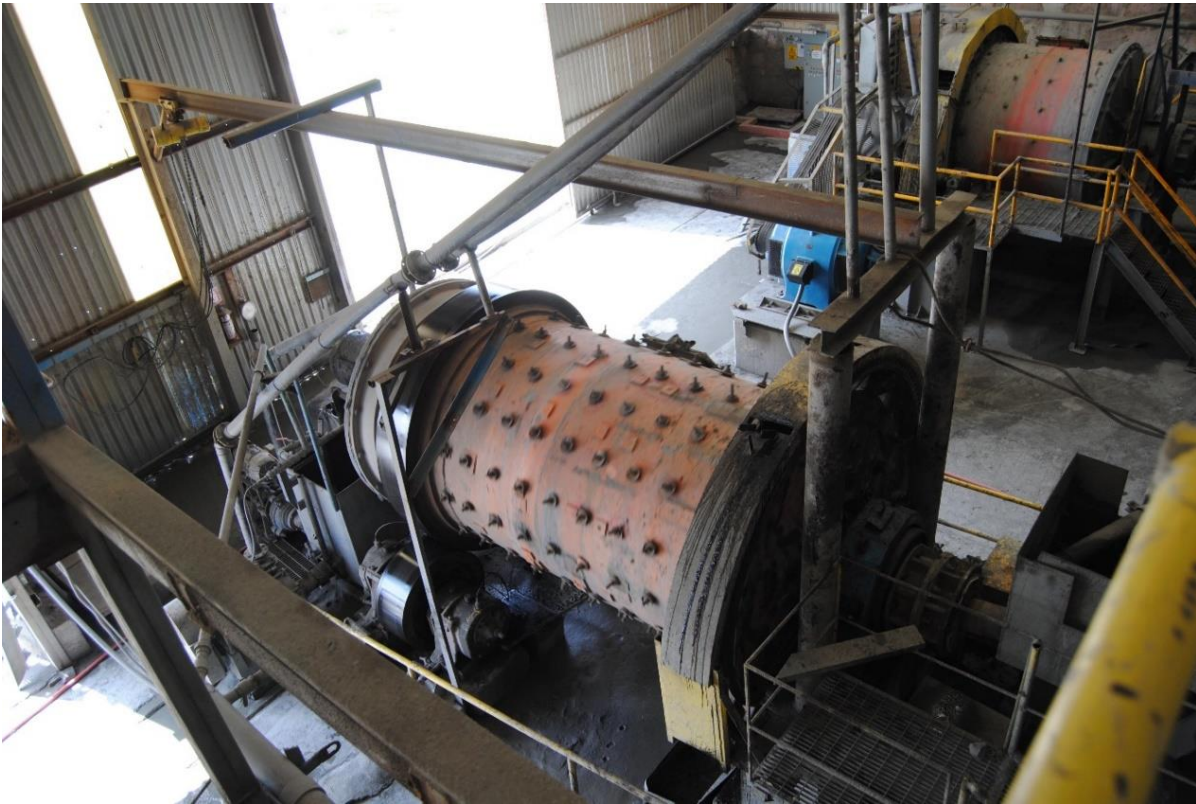
Con respecto a la energía, se informó que el mayor consumo de ésta se tiene en la trituradora y los molinos. Para satisfacer la necesidad de energía, se usa diésel y electricidad, aunque existe la queja de que a veces enfrentan cortes en el suministro eléctrico; el más largo ha sido de dos semanas. También, algunos días tienen que parar algunos aparatos y máquinas entre las 8 y 10 por la noche con el propósito de ahorrar gastos en electricidad, debido a que el costo es más elevado en horas punta.

Figura 4.6. Trituración del material extraído y su transporte mediante bandas en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Figura 4.7. Área de molinos en la planta de beneficio de la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Figura 4.8. Aparato para recircular el agua desde el depósito de jales hacia los procesos mineros mediante una bomba y una tubería en la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.



Aparte de las visitas guiadas a las cuatro unidades mineras descritas, se entrevistaron a otras personas para completar la imagen de la producción minera en el estado Zacatecas. De este modo, el dueño de la mina de San Bernabé comentó, que ésta fue la primera de explotación con el propósito de comerciar en todo el continente americano, ya que inició operaciones en 1546. No obstante, las inundaciones en los socavones impiden la extracción de minerales actualmente, por lo que solo se utiliza con fines turísticos. Las figuras 4.9 y 4.10 muestran el tiro y la rampa hacia los túneles. Además, se exhibieron los planes de convertir una gran parte del terreno que abarca la concesión minera en un campo de golf, a pesar de la escasez superficial del agua, pues la inundación de los socavones demuestra la abundancia de agua subterránea aprovechable para dicho proyecto.

Durante la entrevista con el sindicato de la unidad minera San Martín ubicado en el municipio de Sombrerete se revelaron las razones por las cuales los trabajadores pararon las operaciones de esta. Desde 2007, está cerrada oficialmente por cuestiones de seguridad, por ejemplo, la existencia de temperaturas muy altas y la falta de ventilación en los túneles.

Al final, se hizo una visita de reconocimiento a la mina a cielo abierto Real de los Ángeles, cerrada en 1998 y en la cual se extraía plata, que muestra un paisaje con varios terreros de altura notable. La empresa Frisco no tomó medidas adecuadas para rehabilitar el terreno abandonado anteriormente ocupado por la unidad minera, solamente se cubrieron los depósitos de jales sin especificar con qué material, pero sin realizar obras de reforestación. Aquella acción fue necesaria, porque el viento causaba la contaminación del agua, el aire y el suelo en las inmediaciones afectando al ambiente y a la población de las comunidades debido a la dirección de los vientos.

En la actualidad, las actividades en dicho complejo se limitan a su utilización con un taller mecánico al servicio de la unidad minera El Coronel, perteneciente a la misma empresa *Frisco*, y que se ubica a corta distancia. La visita para conocer las instalaciones fue denegada, pero se ofreció una entrevista informal en la entrada de la unidad.

Figura 4.9. Tiro de la mina San Bernabé con la ciudad de Zacatecas en el fondo.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Figura 4.10. Rampa de acceso a los yacimientos minerales en la mina San Bernabé, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

En resumen, 4 de las 10 unidades mineras contactadas permitieron la visita de sus instalaciones. De esta manera, se pudo recopilar información sobre las características de los depósitos de jales de los cuatro sitios. Mientras que los trabajadores entrevistados en la unidad minera Vetagrande eran los más abiertos para explicar los procesos y mostrar las instalaciones e incluso permitir la toma de fotografías, en Saucito se prohibió el uso de la cámara fotográfica. Aunque los responsables de *Fresnillo plc* fueron muy amables y mostraron una gran parte de las instalaciones de la unidad minera en superficie, los depósitos de jales no se visitaron a pesar de la solicitud realizada. Finalmente, en las instalaciones de la unidad minera Del Toro sí se pudieron tomar fotos, pero el enfoque de la cita se concentró en la entrevista y en la visita de la casa comunitaria ubicada fuera de la unidad minera en la localidad de Chalchihuites.

### **4.3. Análisis FODA**

El proyecto que se presenta intenta buscar la opción menos dañina y perjudicial para los ecosistemas vegetales y animales, así como para la salud humana, bajo condiciones competitivas y económicas aspirando a lograr un desarrollo sustentable. La identificación de zonas muy aptas para generar electricidad con módulos fotovoltaicos puede ocasionar un aumento del valor del suelo de éstas y, en consecuencia, elevar las ganancias para el dueño por vender el terreno a un precio mayor. Así, ese tipo de estructuras puede resultar poco rentable para las empresas. La construcción de un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales de las unidades mineras evita este inconveniente, pero es necesario examinar los argumentos desde la perspectiva de las empresas mineras.

El análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) es un método para averiguar la perspectiva de éxito que tendría una empresa o una organización por la inserción de una cierta medida. Al identificar los componentes, se apoya la toma de decisiones; las características positivas se desean consolidar y aprovechar, mientras que se busca eliminar y evitar los elementos perjudiciales.

El estudio exhaustivo de los factores relevantes evalúa de forma cuidadosa el éxito que podría tener la instalación de una planta fotovoltaica flotante en los depósitos de jales de las unidades mineras del estado de Zacatecas. Esto es muy importante, porque el fracaso de esta propuesta puede ser el resultado de haber descartado uno de los factores.

Por ejemplo, el huracán de categoría 3 ‘Odile’ destruyó en 2014 la planta fotovoltaica de Aura Solar ubicada cerca de La Paz en Baja California Sur, solamente seis meses después de su inauguración. En aquel entonces, era la central de energía solar fotovoltaica más grande de México, al ocupar una superficie de 100 ha y fue diseñada para suministrar a la capital del estado 65 % de su consumo de electricidad, evitando la emisión de 60 000 toneladas de combustibles fósiles al año (León 2016).

A continuación, se describen los componentes del análisis FODA; el orden es el siguiente: primero, se analizan los factores internos que hacen referencia a las fortalezas y las debilidades que tienen las empresas mineras estableciendo su posición “frente a la competencia” (Arriaga López, Ávalos Cueva y Martínez Orozco 2017, 419) y segundo, se muestran los factores externos que influyen de manera positiva o negativa en la competitividad de las empresas mineras al instalar un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales en el área de estudio.

### **Fortalezas**

Las empresas mineras tienen la capacidad de instalar las plantas fotovoltaicas flotantes en los depósitos de jales de las unidades mineras. De este modo, cuentan con una superficie que no tiene otro uso y contribuyen a la conservación de suelo para otras actividades con mayor potencial económico o de alta importancia ecológica. Las empresas mineras han conseguido el terreno que ocupan sus instalaciones productivas mediante una concesión, y la superficie sobre la que se encuentran los depósitos de jales ya les pertenece, por lo que se omite el gasto de comprar tierra adecuada para instalar una planta fotovoltaica flotante. Las unidades mineras con mayor volumen de capacidad de beneficio poseen depósitos de jales más grandes; esto es una ventaja, porque se puede aprovechar un área más amplia para instalar una planta fotovoltaica flotante compuesta de una mayor cantidad de módulos fotovoltaicos.

Otro aspecto que favorece a la empresa minera es el hecho de que la operación de un sistema fotovoltaico flotante en un cuerpo de agua disminuye notablemente la evaporación del agua: se conserva alrededor del 70 y 80 % del agua (Ferrer Gisbert *et al.* 2013, 64; Liu *et al.* 2017, 1139; Rosa Clot, Tina y Nizetic 2017, 665; Sahu, Yadav y Sudhakar 2016, 824). Esto se debe al impedimento de la penetración de la luz solar en las capas superficiales del cuerpo de agua, que, en el caso de los depósitos de jales, aumenta la disponibilidad del agua para su reutilización en los procesos mineros. De acuerdo con Arroyo Sáez (2017, 51), el efecto varía según la inclinación de los módulos fotovoltaicos:

los paneles sin inclinación reducen la evaporación en un 80 %, mientras que los paneles con inclinación o seguimiento de la luz solar en un 69 %; debido a la mayor inclinación de los módulos se expone más agua superficial a la incidencia de los rayos solares.

Para el caso de los depósitos de jales y sus características no se tiene solamente la evaporación del agua en menor medida; se obtiene la ventaja de atenuar la evaporación de agua contaminada y, por consiguiente, mitigar la contaminación del aire con los residuos mineros que quedan flotando en el aire. Esto resulta muy importante, porque los impactos negativos para las comunidades locales por los proyectos mineros son inevitables; por eso, las empresas deberían implementar medidas para reducir estos impactos lo más posible (Moffat y Zhang 2014, 69). Además, el estado de Zacatecas se encuentra en una región en la cual predomina el clima árido y semiárido, que favorece a la dispersión eólica de sustancias tóxicas. Entonces, el efecto de reducir la contaminación ambiental derivada de los depósitos de jales se logra al evitar la evaporación del agua contaminada y por disminuir el área del agua superficial que tiene contacto con el viento. De esta manera, los residuos mineros que dañan al ambiente no solamente disminuyen en el aire, sino también en el agua, el suelo y el subsuelo.

Asimismo, los depósitos de jales no son un hábitat de especies vegetales ni animales. De este modo, la ausencia de luz solar en los depósitos de jales no tiene el efecto sobre la flora y la fauna que tendría en un lago natural. En efecto, Pimentel da Silva y Castelo Branco (2018, 396) aclararon que los lagos naturales experimentan impactos más sustanciales por la planta fotovoltaica flotante que los cuerpos de agua artificiales. La pintura que se usaría para proteger los paneles solares ante la corrosión del agua podría afectar la calidad del agua del depósito; pero el tratamiento del agua con el propósito de adecuarla para su recirculación en los procesos mineros reduce el impacto de la pintura aplicada.

El impacto en el clima local que tienen las plantas fotovoltaicas flotantes puede ser positivo también. En general, los cuerpos de agua tienen la capacidad de absorber el calor térmico de la radiación solar; un proceso que interceptarían los módulos fotovoltaicos, porque éstos reflejarían los rayos solares, provocando el efecto del albedo. El resultado sería un mecanismo con el que las empresas mineras podrían aportar en mitigar el calentamiento atmosférico local.

Un factor muy importante es que los depósitos de jales tienen un efecto refrescante que ejerce el agua sobre los paneles fotovoltaicos. Barbuscia (2017, 8) explicó que el voltaje

se ve afectado debido al aumento de la temperatura, lo que resulta en una pérdida de la cantidad de energía producida. Liu *et al.* (2017, 1139) aclararon que, tomando en cuenta una temperatura del ambiente de 25 °C, que es la utilizada como referencia en los experimentos en laboratorios, el incremento de la temperatura en 1 °C provoca la disminución de la eficiencia eléctrica de los módulos fotovoltaicos como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, Arroyo Sáez (2017, 21) y Liu *et al.* (2017, 1137) concluyeron que la menor temperatura favorece al rendimiento de una planta fotovoltaica. En un experimento (Liu *et al.* 2017, 1140) se demuestra que la temperatura de los paneles de un sistema flotante es de 3.5 °C por debajo de la de los paneles de un sistema convencional terrestre. El resultado es una eficiencia eléctrica mayor, alrededor de 2 % más, mientras que Barbuscia (2017, 8), Choi (2014, 78), Rosa Clot, Tina y Nizetic (2017, 673) y Sahu, Yadav y Sudhakar (2016, 824) indicaron un incremento de 12 %, 10 %, 10 % y 11 %, respectivamente.

Con respecto a los beneficios económicos de un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales, se constata el menor gasto en materiales de construcción, porque la falta de corrientes, olas o mareas hacen innecesarias las estructuras sofisticadas (amarradero o cables submarinos); más bien, la planta flotante se fija con cuerdas en los bordes del vaso de almacenamiento.

Aparte de bajar los costos para la adquisición de combustibles fósiles o energía eléctrica de la CFE, la unidad minera aprovecharía la producción total de electricidad, porque la planta fotovoltaica flotante se instala *in situ*.

## **Debilidades**

El asunto de los costos es un tema de mucha importancia. Barbuscia (2017, 18) indicó que los precios de los paneles solares en México están por debajo de los precios en Japón, Brasil o el estado de California; en cambio, en India, China o Alemania la compra de esos módulos es más económica que en México. La autora señaló también, que la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes es más cara que un sistema montado en tierra (Barbuscia 2017, 41), lo que se comprueba con una comparación que hace la autora en la cual se estimó un costo de 4 % mayor que el de una planta terrestre. Sahu, Yadav y Sudhakar (2016, 824) mostraron una diferencia de 1.2 %, lo que significa una mayor inversión para la construcción de un sistema flotante. Por el contrario, con base en un experimento, Ferrer Gisbert *et al.* (2013, 68) afirmaron que las plantas fotovoltaicas flotantes tuvieron un costo 30 % mayor, que resultó de la necesidad de instalar un pontón

o flotador; éste implicó el 20 % del gasto total, mientras que el costo de los módulos representó 41 %, que es el mismo en ambas tecnologías. El mayor costo de una planta fotovoltaica flotante puede ser una barrera para instalarla en los depósitos de jales, sobre todo las empresas de la minería pequeña o mediana.

La superficie limitada de los depósitos de jales es una desventaja para las empresas mineras, porque impide la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes amplias con el propósito de producir una mayor cantidad de electricidad. Además, el entorno de los depósitos de jales puede disminuir el rendimiento de los paneles solares: la presencia de cerros naturales, terreros o vegetación puede ocasionar un sombreado.

Las empresas mineras siguen una ideología de explotar los yacimientos minerales hasta su agotamiento a un ritmo acelerado. Por eso, existe la incertidumbre con respecto a la vida corta e incierta de una mina con relación a la de una planta fotovoltaica, la cual tiene entre 25 y 30 años de funcionamiento. Entonces, el sistema fotovoltaico flotante se puede considerar como una inversión equivocada para la empresa después de acabar la extracción de los minerales.

Los depósitos de jales de las unidades mineras contienen sustancias tóxicas que pueden afectar el funcionamiento de una planta fotovoltaica flotante a través de la corrosión y los paneles solares por las celdas sensibles. Entonces, la limpieza de éstos no se puede realizar con el agua de los depósitos de jales, sino se requiere el proceso de tratamiento previo de esa agua o el suministro con agua limpia. A causa del clima árido y semiárido en el estado de Zacatecas, la escasez de agua es una desventaja frente a otras unidades mineras.

## **Amenazas**

Para las plantas fotovoltaicas flotantes en los depósitos de jales existen inconvenientes que influyen en el funcionamiento y el rendimiento de esta tecnología. Como se ha comentado previamente, la radiación solar es intermitente. Por lo tanto, se aprovecha durante ciertas horas del día, aunque los procesos mineros se realizan todo el día. Si existe un exceso de energía generada, se requiere la adquisición de una batería costosa para no desperdiciar electricidad; pero la utilidad y el costo de adquisición de una batería deben ser evaluados para un sistema fotovoltaico de escala mediana o pequeña.

De hecho, se presentan más factores que disminuyen la intensidad de la radiación solar (IFC 2015, 53), que desfavorecen a las empresas mineras: el uso de máquina pesada

y químicos que contamina el aire, un área reforestado o el sombreado provocado por los cerros ubicados alrededor de los depósitos de jales. Igualmente, el ensuciamiento de los paneles solares por polvo o excreción de aves disminuye el rendimiento (entre 4 y 15 %). Como se mencionó anteriormente, las unidades mineras se sitúan en zonas con un clima árido y semiárido y el viento dispersa el polvo y, por ende, los módulos fotovoltaicos están expuestos a él. La solución es la limpieza constante de los paneles solares, pero las consecuencias para la empresa minera serían mayores gastos en fuerza de trabajo y agua.

Otro factor es que la minería es una actividad económica rechazada por las comunidades en muchos casos, en los cuales éstas logran detener la producción minera por medio de denuncias relacionadas con las afectaciones a la salud humana o el ambiente ocasionadas por las actividades en la unidad minera. Moffat y Zhang (2014, 61) confirmaron esto, señalando que las diferentes fases de desarrollo de la minería fueron pospuestas, interrumpidas o detenidas por completo a causa de la oposición del público en diversas ocasiones. Entonces, la suspensión temporal de las actividades mineras plantea en qué se usará la electricidad generada o si se parará la operación de la planta fotovoltaica. Esto es una consideración relevante, ya que, para mencionar un ejemplo en el estado de Zacatecas, la unidad minera San Martín en el municipio de Sombrerete se encuentra en huelga desde 2007. Entonces, doce años sin producción minera serían también doce años sin ocupación de la tecnología instalada, de manera que la pregunta sería para quién o cuál sería el destino de la energía solar fotovoltaica que se generaría con el propósito de recuperar las inversiones realizadas para su instalación y mantenimiento.

La fabricación de paneles solares consume recursos minerales como plata, platino, indio, telurio, selenio, rutenio, galio y germanio (IPCC 2012, 728); además del material principal para las celdas, del que destaca el silicio por su abundancia y menor toxicidad. No obstante, la mayor demanda de esos minerales puede causar su explotación a un ritmo más acelerado y, por ende, no sustentable. Entonces, cualquier innovación tecnológica significa un proceso ineludible de desplazamiento de los recursos naturales y de los insumos necesarios para su producción.

La disminución de la evaporación del agua puede alterar el ciclo hidrológico y ocasionar cambios en el microclima; en la actualidad hacen falta investigaciones detalladas sobre los impactos ambientales y posibles consecuencias para los procesos mineros. La destrucción o interrupción del funcionamiento de la planta fotovoltaica



flotante o del depósito de jales a causa de ciclones tropicales y sismos es una amenaza física que perjudicaría a la empresa minera.

## **Oportunidades**

En general, la producción de energía solar fotovoltaica en las unidades mineras tiene el beneficio de que la operación de este tipo energético no genera ninguna emisión de gases de efecto invernadero ni produce residuos radioactivos (Pearce 2002, 669). Por lo tanto, la planta fotovoltaica no contamina el aire, el agua, el suelo o el subsuelo del entorno en el cual está ubicada; de este modo, no contribuye en causar lluvias ácidas ni en la degradación del suelo. Todo esto favorece a la salud humana, porque las comunidades aledañas a las plantas fotovoltaicas no están expuestas a agentes que provocan enfermedades respiratorias.

Pimentel da Silva y Castelo Branco (2018, 390) señalaron que la energía solar fotovoltaica tiene la capacidad de suministrar electricidad a las zonas remotas y de ofrecer empleo a las comunidades rurales. Más allá, la producción de energía es un indicador del desarrollo económico y, por consiguiente, los espacios rurales y no conectados a la red eléctrica pueden experimentar una revalorización y un desarrollo a partir de identificarse con una nueva ruralidad, así como tener una participación en el sector secundario de la economía a través de la generación de energía. Otro aspecto es que la energía solar fotovoltaica favorece la diversificación de las fuentes energéticas y la independencia respecto a los combustibles fósiles.

Además, cabe señalar que puede existir una oposición de la sociedad a la construcción de plantas de energías renovables, por ejemplo, las plantas fotovoltaicas y eólicas. Hanger *et al.* (2016, 81) señalaron esta postura, en la cual describieron una aversión de las comunidades locales contra esos proyectos de infraestructura debido a la posibilidad de ciertos impactos ambientales y socioeconómicos o a la falta de confianza. El rechazo se basa también en la distancia que tiene la propia casa al proyecto; si se encuentra cerca, los habitantes se oponen a la realización de tal proyecto. La principal objeción es que se critica el impacto visual de éstas debido a la ruptura del paisaje. Esto no aplica en el caso de los depósitos de jales por el entorno industrial.

Más bien, como Nasirov y Agostini (2018, 197) indicaron, los sistemas fotovoltaicos en las unidades mineras pueden significar la mejora de la reputación de la empresa por comprometerse con la responsabilidad social y, por ende, este sería otro motivo para

impulsar tales proyectos. Asimismo, Rothen Véliz (2015, 11-12) destacó la mejora de la imagen de las empresas mineras mediante el apoyo a este tipo de proyectos, pues la integración del uso de las energías renovables en la minería impulsa un desarrollo sustentable a causa de una reducción en el consumo de agua y energía. Gabler y Mohring (2002, 73) indicaron un soporte publicitario positivo para cualquier empresa que instala un sistema fotovoltaico, porque demuestra una responsabilidad ecológica y competencia tecnológica. No obstante, esta afirmación se puede cuestionar debido al daño que generan las unidades mineras en el ambiente y los conflictos que provocan con las comunidades locales por la explotación de los recursos naturales y el desplazamiento forzado.

La imagen de una empresa minera es un argumento importante, porque las actividades de la minería provocan también un impacto visual. O bien, las unidades mineras intervienen en el ordenamiento territorial. Casi la tercera parte de la superficie total del estado de Zacatecas está concesionada por las empresas mineras. De este modo, se puede observar un nuevo latifundismo, porque una cantidad considerable de suelo valioso está en las manos de una minoría privilegiada. La colocación de una planta fotovoltaica flotante en un depósito de jales previene grandes cambios en la organización espacial de un sitio, porque se utiliza un suelo que ya tiene un propósito determinado.

En el territorio minero zacatecano visitado durante el trabajo de campo, apenas se pudo constatar la presencia de una unidad minera pequeña o mediana. La figura 4.11 muestra la localidad de Vetagrande, donde la iglesia se eleva sobre el resto del pueblo, y hacia la izquierda se ubica la planta de beneficio y el depósito de jales. La instalación de un sistema fotovoltaico flotante en una localidad como la de Vetagrande tendría un impacto visual evidente; pero sería una opción que preservaría suelo útil para utilizarlo con otros fines. El beneficio para la empresa minera sería una huella atenuada en el ordenamiento territorial.

Figura 4.11. Iglesia y la unidad minera Vetagrande, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

En resumen, se constata la existencia de diversos factores que le proporcionan ventajas competitivas a las empresas mineras al implementar un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales.

Las empresas de la gran minería disponen de los recursos económicos para realizar un proyecto como se presenta en esta investigación. *Fresnillo plc* cuenta con experiencia y éxito en realizar estrategias para el cuidado del ambiente; por el contrario, las empresas de la minería pequeña y mediana podrían confrontar un gasto que afectaría su competitividad.

En este sentido, la interacción entre los factores es importante también: en el caso de que una empresa minera no disponga de los recursos económicos para adquirir una planta fotovoltaica flotante, el periodo de *payback* -que se refiere al plazo de tiempo que se requiere para recuperar la inversión económica de un proyecto de este tipo- es más corto por su instalación en los depósitos de jales, puesto que el rendimiento es mayor, por lo que se produce más energía eléctrica en el mismo tiempo dado. De este modo, los costos iniciales pueden ser una debilidad con menor significancia para la empresa minera.

Los cambios en la intensidad de la radiación solar pueden significar amenazas u oportunidades. La disminución de ésta o de las horas de insolación reduce la cantidad de electricidad producida; por el contrario, el incremento de esos elementos favorece al aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.

El hecho de que la eficiencia energética actual es baja significa otro factor que provoca una desconfianza en la tecnología fotovoltaica. Pero el Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (Fraunhofer ISE 2015, 33) calculó para 2050 un aumento de la eficiencia energética a 24 %, 30 % o 35 %, de acuerdo con la estimación conservadora, moderada u optimista, respectivamente. El incremento será un incentivo importante para el desarrollo de la tecnología y para sus usuarios, porque una eficiencia más alta produce la misma cantidad de energía eléctrica en un área más pequeña o una mayor cantidad de energía eléctrica en la misma área. Las predicciones pueden ser una oportunidad tecnológica para la empresa minera. En el caso de que los avances en la eficiencia energética de los módulos fotovoltaicos no se puedan cumplir, se consideraría esto más bien como una amenaza, ya que la generación de energía eléctrica sería menor de la esperada.

En el cuadro 4.3 se muestran los factores del análisis FODA antes señalados de forma simplificada para recapitularlos.

Cuadro 4.3. Resumen de los factores del análisis FODA que favorecen y desfavorecen la construcción y la operación de los sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales para las empresas mineras.

Análisis	Componentes	Factores
Interno	Fortalezas	Disponibilidad de recursos económicos en empresas de la gran minería
		Sin compra de terreno adicional y costoso
		Instalación de plantas fotovoltaicas flotantes más grandes en depósitos de jales más amplios
		Ocupación de suelo sin valor para otro uso y no habitado por especies vegetales o animales
		Mayor disponibilidad de agua para procesos mineros por menor evaporación de agua
		Disminución de la evaporación del agua contaminada y de la propagación de sustancias tóxicas
		Mayor reflejo que absorción de los rayos solares que contrarresta el calentamiento atmosférico
		Mayor eficiencia energética por el efecto refrescante del cuerpo de agua
		Ahorro por la fijación simple de la estructura flotante
		Ahorro por la producción de electricidad <i>in situ</i>
	Debilidades	Impacto económico para las empresas de la minería pequeña y mediana
		Costo de los módulos fotovoltaicos más elevado que en otros países
		Costo de la planta fotovoltaica flotante más elevado que la planta terrestre
		Superficie limitada en los depósitos de jales
Sombreado ocasionado por los cerros naturales y artificiales o la vegetación en las inmediaciones		
Diferencia entre la vida útil de la mina y la planta fotovoltaica		
Corrosión de la estructura de la planta por el agua que contiene sustancias tóxicas		
Falta de agua adecuada para la limpieza de los módulos fotovoltaicos		
Externo	Amenazas	Cambios en la intensidad de la radiación solar
		Gasto de batería no considerado para no desperdiciar el exceso de electricidad generada
		Ensuciamiento de los módulos fotovoltaicos por el polvo o la excreción de aves
		Labores detenidas por las quejas de comunidades locales o los asuntos legales
		Cambios en el microclima por la alteración del ciclo hidrológico
		Daños y destrucción de la planta fotovoltaica flotante por los ciclones tropicales o los sismos
	Oportunidades	Sin emisión de los gases de efecto invernadero o acumulación de los residuos radioactivos durante la operación
		Sin impacto en la salud humana por la ausencia de los contaminantes y del ruido
		Suministro de la energía eléctrica a las zonas remotas
		Oferta de los puestos de trabajo a las comunidades locales
		Diversificación de las fuentes energéticas e independencia de los combustibles fósiles
		Menor impacto visual o ruptura del paisaje
		Mejora de la reputación de la empresa frente a la sociedad
		Sin intervención esencial en el ordenamiento territorial

Fuente: Elaboración propia con base en Arroyo Sáez (2017), Barbuscia (2017), Ferrer Gisbert *et al.* (2013), Gabler y Mohring (2002), IFC (2015), Liu *et al.* (2017), Moffat y Zhang (2014), Nasirov y Agostini (2018), Pearce (2002), Pimentel da Silva y Castelo Branco (2018), Rosa Clot, Tina y Nizetic (2017), Rothen Véliz (2015) y Sahu, Yadav y Sudhakar (2016).

#### 4.4. Potencial de la propuesta

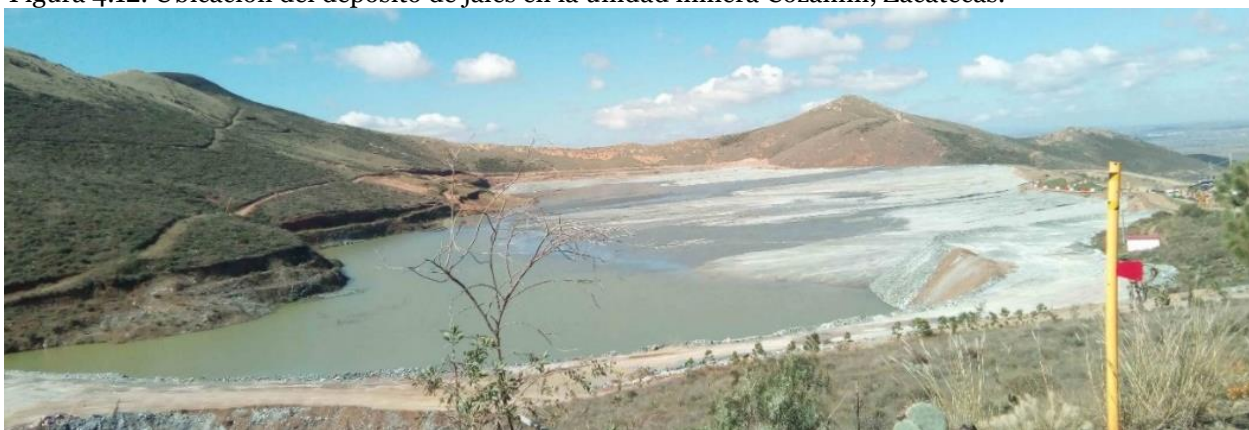
Antes de ahondar en el potencial de la idea propuesta, es importante explicar de qué aspectos depende éste. Como se explicó anteriormente, la energía solar fotovoltaica se puede aprovechar adecuadamente si se consideran ciertos criterios y restricciones. De este modo, la radiación solar, los hechos topográficos o el uso del suelo son las variables principales que influyen en la factibilidad y la productividad de una planta fotovoltaica. Esas variables se gestionan también de forma digitalizada en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Aunque son una herramienta potente, para su manejo se requiere la información espacial no solamente del territorio de interés, sino, también en una escala adecuada para el análisis de los fenómenos locales. Por ejemplo, Cebecauer, Huld y Šúri (2007, 3555) resaltaron la significancia de una resolución alta del Modelo Digital de Elevaciones (DEM por sus siglas en inglés) para precisar la aplicación de un sistema fotovoltaico debido a los efectos que tiene el sombreado en el rendimiento de los paneles solares. Más bien, una resolución muy alta (10-25 m) permite la precisión más exacta de la predicción del sombreado y la radiación solar incidente (Cebecauer, Huld y Šúri 2007, 3553). Sin embargo, se constata que en un territorio más pequeño no hay grandes diferencias en la intensidad de la radiación solar.

La disponibilidad de datos completos y confiables es el requisito indispensable para elaborar mapas con valor informativo para contribuir a una toma de decisiones apropiada en cuanto a solucionar problemas o visibilizar situaciones presentes. Más bien que la herramienta, el método juega un papel muy importante. Eastman (2005, 493) recalcó la evaluación de criterios múltiples en SIG concierne con la asignación adecuada de terreno a un objetivo específico con base en la variedad de atributos que debería poseer el área seleccionada. A causa de la multitud de criterios y restricciones identificados previamente, la evaluación de criterios múltiples (MCE por sus siglas en inglés) puede considerar ésta y los SIG permiten la representación de los resultados, señalando los sitios más adecuados. De esta manera, Boni Vicari (2012, 28) afirmó que la evaluación sobre el potencial de un área para un propósito concreto es lo que convierte a los SIG en una herramienta útil para el ordenamiento territorial. En efecto, Sánchez Lozano *et al.* (2013, 548) dirigieron esto al ámbito de los sistemas fotovoltaicos: el proceso puede llevar a conseguir el área más favorable para la instalación de una planta solar fotovoltaica. Cabe mencionar que puede resultar imposible para un lugar cumplir con todos los requisitos, por lo que los autores enfatizaron en que ese método busca la opción más cercana a la solución ideal. Y, esa

solución se refiere a mostrar los sitios propensos para aprovechar la energía solar fotovoltaica. La IFC (2015, 58) señaló que la selección de un lugar adecuado es un componente crucial para desarrollar un proyecto solar fotovoltaico rentable. Gabler y Mohring (2002, 71) hicieron constar que el logro del mayor rendimiento de la planta fotovoltaica depende de su localización y su diseño.

De hecho, en el caso de la unidad minera Cozamin ubicada muy cerca de la ciudad de Zacatecas se muestra la problemática de un cerro pegado al sur del depósito de jales (figura 4.12); el potencial de un sistema fotovoltaico flotante ahí puede ser menor por el sombreado ocasionado. Por eso, es necesario incluir las propiedades topográficas del entorno en los SIG o realizar un trabajo de campo para observar meticulosamente la zona de estudio, aunque esto último solo se puede realizar en una muestra pequeña. No obstante, esta investigación busca proponer plantas fotovoltaicas con una estructura flotante en los depósitos de jales y estimar la aportación de éstas para satisfacer el consumo energético de los procesos mineros de manera general, por lo que se descartó realizar el análisis del DEM, ya que el propósito principal no es encontrar los sitios más propensos para aprovechar la energía solar fotovoltaica. Además, la decisión para considerar solamente los depósitos de jales implica la menor disposición de lugares aptos y los criterios se concentran más en la radiación solar, el tamaño de los depósitos de jales, así como la cantidad de agua que contienen.

Figura 4.12. Ubicación del depósito de jales en la unidad minera Cozamin, Zacatecas.



Fuente: Cortesía de Isidro Téllez Ramírez, 2019.

Aunque la difusión de sistemas fotovoltaicos en las unidades mineras a nivel mundial todavía es escasa, Rothen Véliz (2015, 13, 15) indicó que las energías renovables en general tienen un potencial notable para la minería, porque existe “un interés fundamental en reducir su uso de energía por unidad producida, debido a las obvias implicaciones de los costos de producción”, que se generan a partir del abastecimiento

eléctrico y de la adquisición de combustibles fósiles. No obstante, el potencial de plantas fotovoltaicas flotantes en México no ha sido tema de una investigación. En Chile, la construcción de un sistema sobre un depósito de relaves en la unidad minera Los Broncos en el centro del país llamó la atención, porque la producción anual de energía eléctrica es de 150 MWh y evita la emisión de 58 toneladas de CO<sub>2</sub> al año (figura 4.13). La planta fotovoltaica consiste en 256 paneles solares de silicio policristalino sin marco de aluminio, que son resistentes a los vientos y los sismos. Para los responsables de la unidad minera, el sistema fotovoltaico flotante tiene los beneficios de conservar el ambiente, emplear el agua de manera eficiente, así como ayudar a la minería a ser más sustentable (Riquelme y Carreño, 2019).

Figura 4.13. Planta fotovoltaica flotante en la unidad minera Los Broncos en Chile.



Fuente: Tomado de Ciel et Terre (2018).

Entonces, es importante comparar el potencial del ejemplo de Chile con la posibilidad de producir energía en los depósitos de jales zacatecanos. Para estimar el potencial, se consideraron las catorce unidades mineras previamente seleccionadas. A causa de que la cantidad de unidades mineras es abarcable y factible, se analizaron manualmente los valores de la radiación solar, el área disponible en los depósitos de jales y la energía generada hipotética de cada unidad. Un estudio más exhaustivo demandaría más tiempo, o bien, sería imposible sin el empleo de los SIG.

En esta investigación, se tomaron en cuenta tres sitios en línea que permiten la simulación informática para estimar la capacidad anual para producir energía fotovoltaica. Las tres diferentes fuentes posibilitan dar una visión general del potencial que tendrían

los sistemas fotovoltaicos flotantes en los depósitos de jales y concretar la propuesta. Uno de los datos obligatorios para la simulación era el área que ocuparía la planta fotovoltaica. Por medio de *Google Earth* se localizaron los depósitos de jales de las catorce unidades mineras y se dibujaron polígonos sobre la superficie que aparentemente tenía agua. Después, se le restó a esa área un 25 % por la estructura de la planta sin módulos y por cambios posibles del nivel de agua a lo largo de un año, que disminuirían el tamaño del sistema fotovoltaico. Para obtener resultados comparables, en las tres páginas web se les asignó a los paneles solares una inclinación de 20° hacia el sur, así como el material de silicio monocristalino con una eficiencia energética de 15 %. El hecho de que el rendimiento de los módulos está aumentando constantemente significa un mayor potencial en el futuro para las nuevas instalaciones. Con respecto a la inclinación de los paneles solares, se aclara que el valor de la latitud es un buen indicador para guiarse, pero también se deseó impedir lo más posible la incidencia de los rayos solares para evitar la evaporación del agua contaminada.

Cabe mencionar que los sitios web no consideran construcciones flotantes, por lo que se agregó un 10 % al resultado de la energía generada durante un año. En el caso de los depósitos de pastas, que no manejan la cantidad de agua necesaria para estructuras flotantes, el potencial radica más bien en la etapa postoperatoria, que inicia después del cierre de ese depósito, cuando con una planta fotovoltaica terrestre se podría producir energía eléctrica. Aunque la unidad minera Del Toro utiliza esa técnica para manejar los residuos, se incluyó en el cálculo del potencial, pero con la premisa de rehusar la eficiencia eléctrica aumentada en un 10 %. Es importante aclarar que las simulaciones están dirigidas a estimar el rendimiento de plantas terrestres y, por ende, las indicaciones en cuanto al diseño de éstas pueden dar resultados discrepantes en la realidad. Esto se debe al hecho de que no existe la opción de sistemas para cuerpos de agua, por lo que las estimaciones realizadas en este trabajo se deben considerar como una primera aproximación al tema.

Los resultados, que se aprecian en la figura 4.14, hacen constar que las simulaciones del *PVWatts® Calculator* (NREL) y del *Global Solar Atlas* (Banco Mundial 2019a) se acercan claramente, mientras que el *Photovoltaic Geographical Information System* (Comisión Europea 2019a) estima una producción energética en un 20-25 % menor que las otras dos. El cuadro 4.4 muestra los valores y el hecho de que la radiación solar está por debajo de las otras dos explica la menor energía generada. Pero el *Global Solar Atlas* indica menores valores de la intensidad de los rayos solares que el *PVWatts® Calculator*,



entonces, no es la única razón, ya que ambos softwares en línea prácticamente no difieren en los datos estimados sobre la producción de energía. La discrepancia entre los valores de la radiación solar no se puede aclarar con ayuda de la información proporcionada en los sitios en línea. Lógicamente, con la mayor superficie disponible en los depósitos de jales, se pueden instalar plantas fotovoltaicas flotantes más grandes, que, posteriormente, generarán más energía debido al mayor número de paneles solares.

De este modo, la unidad minera Peñasquito predomina por mucho, por delante de Fresnillo y Saucito. En general, se constata que solamente la unidad minera San José generaría menos energía que Los Broncos en Chile, que para Latinoamérica son los pioneros en gestionar esa tecnología nueva en tal ámbito. Igualmente, se aprecia en el mapa que el centro y el sureste del estado de Zacatecas cuentan con mayor radiación solar que el oeste o noreste.

Cabe mencionar que se presenta una insolación alta, puesto que el promedio es de 2189 horas de insolación al año en los sitios de las unidades mineras seleccionadas. En efecto, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) indicó valores más altos en los observatorios de los municipios de Sombrerete y Zacatecas, en los cuales se encuentran las unidades mineras de Sabinas y El Compas, respectivamente. Para el periodo de 1981 a 2000, la estación climatológica ubicada en Sombrerete registró un total de 2512 horas de insolación al anuales, mientras que fueron 2890 en Zacatecas. Por lo tanto, se puede suponer que la producción de electricidad es mayor que en las simulaciones se obtuvieron, porque los registros de las estaciones climatológicas son más precisos que los datos obtenidos mediante las imágenes de satélite. Además, a nivel estatal no se observan grandes diferencias en la cantidad de radiación solar; esto influiría de manera positiva en el potencial de la energía solar fotovoltaica en cualquiera de las unidades mineras seleccionadas en el estado de Zacatecas. No obstante, el IPCC (2012, 342-343) aclaró que México carece de estaciones climatológicas adecuadas para compilar una base de datos confiable con registros sobre la radiación solar durante un periodo de 30 años o más. Como consecuencia de ello, la información amplia se basa en las imágenes de satélite que proporcionan valores menos exactos.

Para contrastar, Alemania, que tiene una difusión de sistemas fotovoltaicos mucho mayor que México, llega apenas a 1400 horas de insolación al año (Comisión Europea 2019b). Esto no es un argumento en contra de la importancia de la cantidad de radiación solar; más bien, destaca el potencial de México y, en especial, del estado de Zacatecas para aprovechar la energía solar fotovoltaica.

Finalmente, se demuestra la oportunidad de utilizar los depósitos de jales para generar cantidades de energía notables para aportar al balance eléctrico en las unidades mineras, aunque éstas deben presentar un volumen de producción alto para contar con depósitos de jales de tamaño considerable. La electricidad producida puede satisfacer un parte de la demanda energética de los procesos mineros, pero también se podría dirigir a la infraestructura interna de la unidad minera, por ejemplo, la iluminación o el equipo electrónico en las oficinas.

Cuadro 4.4. Resultados de las simulaciones sobre el rendimiento de plantas fotovoltaicas flotantes en los depósitos de jales.

Unidad minera	Área disponible* (m <sup>2</sup> )	Banco Mundial		Comisión Europea		NREL		Promedio de las tres fuentes	
		Producción energética** (MWh/año)	Insolación (kWh/m <sup>2</sup> )	Producción energética** (MWh/año)	Insolación (kWh/m <sup>2</sup> )	Producción energética** (MWh/año)	Insolación (kWh/m <sup>2</sup> )	Producción energética** (MWh/año)	Insolación (kWh/m <sup>2</sup> )
Peñasquito	450 000	133 968	2169	101 418	1810	132 985	2409	122 790	2129
Fresnillo	125 625	38 596	2236	30 308	1912	38 865	2515	35 923	2221
Saucito	69 000	21 075	2208	16 598	1900	21 467	2540	19 713	2216
El Coronel	38 625	11 762	2232	9308	1916	11 915	2493	10 995	2214
F.I. Madero	35 400	10 910	2245	8623	1922	10 944	2508	10 159	2225
Tayahua	13 125	3915	2172	3043	1839	3920	2489	3626	2167
La Colorada	11 625	3490	2181	2662	1810	3483	2416	3212	2136
Del Toro***	9375	2515	2141	1977	1829	2582	2424	2358	2131
Cozamin	7125	2171	2204	1739	1904	2218	2529	2043	2212
Vetagrande	6675	2037	2202	1593	1874	2043	2486	1891	2187
Sabinas	5250	1610	2199	1252	1874	1602	2478	1488	2184
Aranzazu	4875	1483	2209	1152	1866	1492	2493	1376	2189
El Compas	2775	851	2211	679	1910	846	2475	792	2199
San José	338	101	2242	81	1922	104	2526	95	2230
Total	779 813	234 484	-	180 433	-	234 466	-	216 461	-

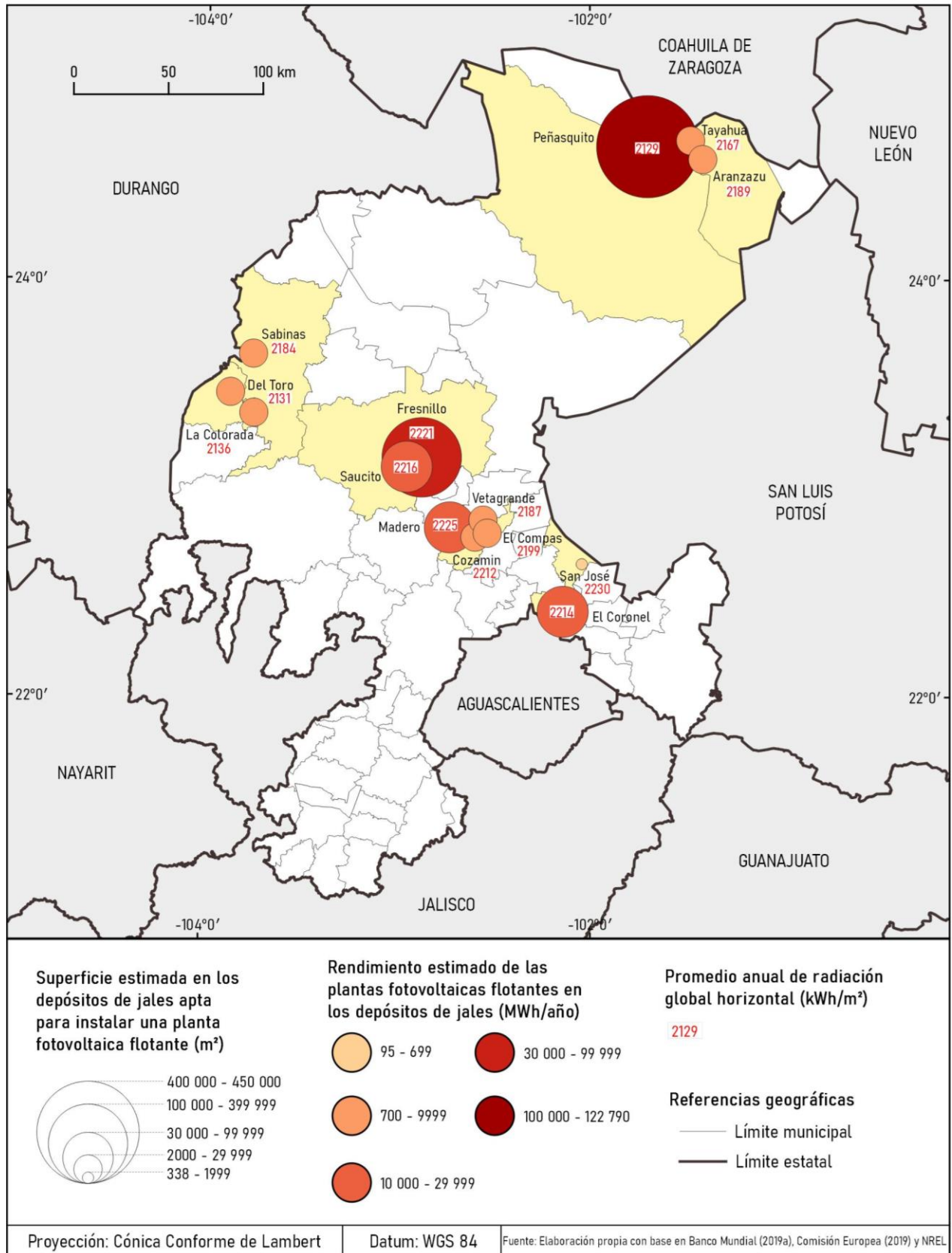
Fuente: Elaboración propia con base en Banco Mundial (2019a), Comisión Europea (2019a) y NREL.

\* El área disponible se estimó por medio de Google Earth (2019), tomando en cuenta el espacio de la construcción que no produce energía y las partes de los depósitos de agua que no llevan agua en las imágenes de satélite.

\*\* Se agregó un 10 % al resultado por el empleo de sistemas fotovoltaicos flotantes.

\*\*\* La unidad minera Del Toro no cuenta con depósitos de jales húmedos por utilizar la técnica de pastas, lo que impide el aumento de 10 % en la eficiencia energética.

Figura 4.14. Generación de energía solar fotovoltaica en las unidades mineras del estado de Zacatecas, 2019.



La estimación del potencial aproximado de los sistemas fotovoltaicos flotantes que existe en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas varía de acuerdo con el área disponible, por lo que los resultados obtenidos fueron heterogéneos a pesar de que la radiación solar es semejante. *Grosso modo* se calculó el rendimiento hipotético mediante las imágenes de satélite debido a la falta de información sobre la extensión de los depósitos de jales y su disposición de agua. Por eso, los valores sirven solo como referencia.

Las unidades mineras de Peñasquito, Fresnillo y Saucito tienen probablemente el mayor potencial. De hecho, en Peñasquito se registra la menor intensidad de radiación solar entre todas las unidades mineras seleccionadas. Sin embargo, la baja concentración del oro y de la plata en el subsuelo hacen necesario la remoción de grandes volúmenes de material. Las plantas de beneficio están diseñadas para procesar esas cantidades y, posteriormente, los depósitos de jales son más extensos y favorecen la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes con mayor número de paneles solares. La presencia de los peligros hidrometeorológicos mencionados anteriormente es moderada: las sequías tienen un grado de peligro medio en los municipios de Mazapil y Fresnillo, mientras que los ciclones tropicales uno muy bajo; con respecto a las tormentas de granizo y las nevadas, en Mazapil hay un mayor grado de peligro que en Fresnillo, pero en ambos casos no son altos. Por lo tanto, una destrucción física de los módulos en los sistemas fotovoltaicos flotantes ubicados en los depósitos de jales o la interrupción de la operación de este tipo para generar electricidad por los peligros identificados es menos probable que en otros sitios.

En cambio, el caso de la unidad minera El Coronel parece interesante por el hecho de que tiene la segunda planta de beneficio con mayor capacidad del estado zacatecano. Esto significa una extensión grande del depósito de jales para el almacenamiento de los residuos mineros; pero la superficie cubierta por agua es menor que en Fresnillo y Saucito y, por consiguiente, la producción de electricidad es más bajo.

## Conclusiones

Los sistemas fotovoltaicos flotantes instalados en los depósitos de jales de las unidades mineras en el estado de Zacatecas satisfarían una parte de la demanda energética. La superficie del depósito de jales cubierta con agua es un factor decisivo, ya que es proporcional a la electricidad generada. Debido a su extensión reducida en algunas de las unidades mineras seleccionadas, la aportación de la energía solar fotovoltaica como fuente energética es limitada y menos rentable. En cambio, en los lugares con volúmenes de producción minera alta y, por consiguiente, la presencia de depósitos de jales más grandes, la inserción de este tipo de energía valdría la pena y sería una alternativa para producir la electricidad que se consumiría *in situ* y para aprovechar el potencial por la cantidad de radiación solar que existe en el estado zacatecano.

La aptitud de los depósitos de jales como sitios adecuados y prometedores para la instalación de los sistemas fotovoltaicos flotantes se comprueba por la gran cantidad de ventajas que poseen; además, se lograría eliminar varios impactos negativos que tendrían las plantas fotovoltaicas terrestres o flotantes ubicadas en los cuerpos de agua naturales.

El beneficio de aprovechar la energía solar fotovoltaica no radica solamente en la generación de electricidad a partir de este tipo energético; más bien, las empresas mineras podrían arreglar su reputación. En el caso de Peñasquito, la mejora de su imagen con la instalación de una planta fotovoltaica tal vez podría contribuir a reducir el número de paros recurrentes realizados por las comunidades aledañas motivados por razones ambientales. En cambio, en las unidades mineras Fresnillo y Saucito de la empresa *Fresnillo plc* han desarrollado una gran consciencia en la atención a los habitantes y se les han otorgado certificados a causa de su cuidado al ambiente. Entonces, su reputación ecológica e importancia por la elevada producción de plata a nivel nacional y mundial debería despertar su interés en invertir y podría fomentar la difusión de tal tecnología en virtud de que su ejemplo sería seguramente imitado.

La cantidad posible de energía generada es un buen argumento para recomendar la instalación de un sistema fotovoltaico flotante para diversificar las fuentes energéticas que se requieren para abastecer la demanda de electricidad de los procesos mineros. Pero la falta de datos sobre este consumo total en las unidades mineras no permite estimar la participación porcentual hipotética de las estructuras flotantes.

La identificación de la existencia de un patrón espacial en la ubicación de las unidades mineras y en la concentración de la población con mejores condiciones socioeconómicas de la entidad federativa es otro resultado fundamental de este proyecto. En la franja diagonal desde el sureste hacia el noroeste del estado zacatecano, se localiza la mayoría de las unidades mineras activas con producción de minerales metálicos, en específico, el oro, la plata, el plomo, el zinc y el cobre. Aparte de la concentración de las unidades mineras en esa región, se observaron las mejores condiciones socioeconómicas de la población en los municipios dentro de esa franja para los años de 2010 y 2013. Obviamente, no se puede deducir que, debido a la actividad minera, esos territorios ofrecen la mejor calidad de vida para sus habitantes. Sin duda, ello implica la interrelación de otros factores condicionantes, por ejemplo, el medio físico-geográfico o la red de carreteras o ferrocarriles. Por ejemplo, la región descrita carece de eventos extremos de la atmósfera y mantiene condiciones climáticas moderadas. También, los accidentes topográficos no tienen la magnitud de los existentes en el sur y suroeste. Un estudio más detallado a nivel de localidad podría posibilitar una interpretación más certera, mediante la comparación de las localidades en las que se ubican las unidades mineras con el resto de las localidades del municipio para identificar semejanzas y diferencias posibles en sus condiciones de vida por la participación de la actividad minera.

En cuanto a las plantas fotovoltaicas, se hizo una compilación de los criterios y las restricciones para identificar la ubicación más adecuada; la mayoría de los autores están de acuerdo con los componentes, pero difieren de la ponderación de éstos. Asimismo, se conocieron los diferentes tipos de estructuras con sus ventajas y desventajas, en las cuales se reveló una mayor eficiencia energética de los sistemas flotantes. Su aplicación en los depósitos de jales cuenta con diversas ventajas para el ambiente, las comunidades aledañas y la empresa, aunque el costo inicial puede desalentar la adquisición. El análisis FODA es un método útil para identificar la perspectiva de éxito de esta propuesta.

Con referencia a la minería, el estado de Zacatecas es importante por el volumen de la producción obtenida en diferentes tipos de minerales metálicos, lo que le convierte en una entidad federativa eminentemente minera; el valor agregado censal bruto empleado contribuyó a diferenciar la significancia de la actividad minera a nivel municipal.

El procedimiento del manejo de los residuos mineros se describió para entender la construcción de los depósitos de jales. Su tamaño es proporcional a la capacidad de la planta de beneficio, en la que se procesan los minerales extraídos. Por eso, cuanto mayor

es la cantidad de material extraído en las minas, tanto mayor es la capacidad de las plantas de beneficio y tanto mayor es la extensión y la profundidad de los depósitos de jales.

El aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en la minería, que contribuye considerablemente a la contaminación ambiental por la emisión del CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> o N<sub>2</sub>O, puede reducir las emisiones de esos gases de efecto invernadero en las unidades mineras al sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles y evitar la dispersión de contaminantes u otras sustancias tóxicas al medio físico.

En general, la instalación de esta tecnología obviamente afecta el ambiente o requiere inversiones notables. Asimismo, la eficiencia energética, cuyo porcentaje todavía presenta mucho potencial para mejorar, no ayuda a confiar incondicionalmente en la energía solar fotovoltaica. Pero su colocación en los depósitos de jales previene los impactos ambientales que normalmente generarían en las ubicaciones típicas. Entre ellos, destaca la preservación de vegetación o suelo útil para otras actividades económicas o la protección de la fauna silvestre. Para respaldar la ventaja de la menor contaminación del entorno de los depósitos de jales a causa de la menor evaporación de agua que contiene sustancias tóxicas, se podrían realizar muestreos del suelo antes y después de la instalación de un sistema fotovoltaico flotante.

Otro aspecto de la reducción de la evaporación de agua es la intervención en el ciclo hidrológico local y, posteriormente, en el microclima, que tendría impactos más sustanciales en los cuerpos de agua naturales. Los depósitos de jales de las unidades mineras son considerados como lugares adversos y nocivos para la vida vegetal y animal. Existe la probabilidad de que la vegetación en las inmediaciones de los depósitos de jales recibiría una menor cantidad de agua, pero también sería menos agua contaminada. Los ingenieros encargados de la planeación y planificación de la gestión de los residuos mineros tendrían que tomar en cuenta que el vaso de almacenamiento de los depósitos de jales requeriría mayor extensión o profundidad para evitar los derrames, ya que se estima un mayor volumen de agua disponible.

El empleo de la tecnología de pastas evita de todas maneras el desbordamiento de sustancias tóxicas. Sin embargo, su construcción es más costosa que la de los depósitos de jales húmedos y su apilamiento impide la instalación de cualquier estructura fotovoltaica. En efecto, el análisis correcto y el manejo apropiado de los residuos previenen de los derrames en los depósitos de jales con agua, que cuentan además con la ventaja de recircular el agua para su reutilización en los procesos mineros.

En cuanto al impacto visual para los habitantes en las inmediaciones, los otros modos para generar energía eléctrica, por ejemplo, las centrales nucleoelectricas o las refinerías, así como el transporte de los combustibles hacia las unidades mineras remotas por medio de camiones de carga también provocan una ruptura del paisaje. Sin embargo, estas transformaciones dañan a la salud humana por las emisiones de contaminantes, mientras que la energía solar fotovoltaica es libre de esas sustancias.

Una empresa de la pequeña minería puede renunciar a la idea de introducir un sistema fotovoltaico flotante en los depósitos de jales por el capital inicial necesario. Por el contrario, las organizaciones grandes, por ejemplo, *Fresnillo plc*, disponen de los recursos que posibilitarían la realización de tal proyecto. Pero ni la obligación hacia el ambiente ni la evidencia de las ventajas son suficientes para instalar una planta fotovoltaica flotante.

En este sentido, las políticas públicas juegan un papel inmensamente importante para el reconocimiento de las nuevas tecnologías de generación energética, ya que el poder de convicción de la ciencia no basta. El apoyo económico para las pequeñas empresas en forma de un crédito o la modificación del reglamento para establecer como obligatorio el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en las unidades mineras de empresas grandes. Otros tipos de patrocinio serían complicados, porque la reducción de la carga fiscal a pesar de las ganancias por la producción minera podría alimentar un nuevo motivo de conflicto entre las comunidades locales y las empresas mineras. Por eso, las normas y los reglamentos deberían inducir o incentivar la instalación de las plantas fotovoltaicas para contribuir a lograr las metas planeadas para mitigar el cambio climático.

Con el capital inicial suficiente para instalar una planta fotovoltaica en el depósito de jales, se puede aumentar la competitividad de la empresa minera, porque se independiza en cierto grado de los precios inestables del petróleo o de los generadores que emplean diésel, así como del gasto para la adquisición de tales combustibles. En efecto, la independencia no sería solamente de los combustibles fósiles, sino, en general, de la red nacional de electricidad. Debido a la extensión reducida de un sistema fotovoltaico flotante, esa seguridad energética es limitada, evidentemente. Pero la unidad minera podría ser menos propensa a las interrupciones repentinas de la red eléctrica. Y, aunque México tiene yacimientos petroleros, el estado zacatecano no cuenta con reservas de hidrocarburos, por lo que está obligado a importar el energético de otras entidades federativas.



El hecho de que el estado de Zacatecas cuente con una radiación solar considerable demuestra el gran potencial existente en su territorio para fomentar el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica. En cambio, el viento puede variar en su intensidad de un lugar a otro de manera decisiva y el agua superficial es escasa en la entidad federativa, por lo que las energías eólica e hidroeléctrica, respectivamente, pueden resultar menos rentables.

Este proyecto se concentró en las unidades mineras activas ubicadas en el estado zacatecano. Sin embargo, existe una discrepancia entre la vida útil de una unidad minera y una planta fotovoltaica. Aunque hay minas que siguen operando desde la época colonial, en la actualidad se observa una tendencia hacia una explotación más rápida e intensiva de los yacimientos minerales. Puesto que un sistema fotovoltaico llega a producir energía eléctrica a lo largo de 25 a 30 años, se puede suponer que su duración de vida rebasa a la de una unidad minera. Una alternativa sería que se desmantelara el equipo y se instalara en otro depósito de jales, si la empresa minera cuenta con más unidades. Otra sería que la empresa minera podría vender la instalación a otra unidad minera o transformar la estructura flotante en una terrestre.

La aplicación de los sistemas fotovoltaicos flotantes sería también lucrativa después del cierre de la operación minera en la etapa postoperatoria en la cual se dedicaría el terreno a un uso diferente de la minería, pero el sistema fotovoltaico seguiría en funcionamiento para otros fines y usuarios.

En esta investigación, no se buscó tomar una posición completamente en contra o a favor de la actividad minera. Más bien, se entiende que ciertos minerales son necesarios para la fabricación de productos que se requieren por el estilo de vida de las personas, y que ellos se tienen que producir en grandes cantidades por la gran demanda de la población mundial. Es importante aclarar que el propósito principal de este proyecto no era la identificación de los factores que mejorarían la imagen de las empresas mineras para enmascarar su daño ambiental y conflictividad en asuntos socioterritoriales. La dinámica de las empresas mineras, que se caracteriza por una explotación intensiva y la puesta en práctica de acciones no suficientes para la protección y rehabilitación del medio físico, se debería reajustar para demostrar un mejor equilibrio entre la extracción de minerales y el cuidado del ambiente.

## Referencias

- Agencia Internacional de Energía. 2015. *Photovoltaic Power Systems Programme: Energy from the Desert*. Acceso el 30 de agosto de 2019. <http://iea-pvps.org/index.php?id=316>.
- Agencia Internacional de Energía. 2019a. *Photovoltaic Power Systems Programme: Annual Report 2018*. Acceso el 30 de agosto de 2019. <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=6>.
- Agencia Internacional de Energía. 2019b. *Photovoltaic Power Systems Programme: Snapshot of Global PV Markets 2019*. Acceso el 30 de agosto de 2019. [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS\\_T1\\_35\\_Snapshot2019-Report.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_T1_35_Snapshot2019-Report.pdf).
- Agencia Internacional de las Energías Renovables. 2015. *Renewable Energy Prospects: Mexico*. Emiratos Árabes Unidos. Acceso el 30 de septiembre de 2019. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA\\_REmap\\_Mexico\\_report\\_2015.pdf?la=en&hash=8A259915297B04B0D50A422EDF48AD87007B56B1](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Mexico_report_2015.pdf?la=en&hash=8A259915297B04B0D50A422EDF48AD87007B56B1).
- Arán Carrión, José, Antonio Espín Estrella, Fernando Aznar Dols y Ángel Ramos Ridao. 2007. «The electricity production capacity of photovoltaic power plants and the selection of solar energy sites in Andalusia (Spain)». *Renewable Energy* 33: 545-552. Acceso el 12 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.05.041>.
- Arriaga López, Fabiola Guadalupe, David Ávalos Cueva y Edgardo Martínez Orozco. 2017. «Propuesta de estrategias de mejora basadas en análisis FODA en las pequeñas empresas de Arandas, Jalisco, México». *Ra Ximhai* 13: 417-424. Acceso el 17 de diciembre de 2019. <https://www.redalyc.org/pdf/461/46154070025.pdf>.
- Arroyo Sáez, Víctor Jesús. 2017. «Estudio de prefactibilidad de la implementación de un parque fotovoltaico flotante en depósitos de relave en la zona centro-norte de Chile». Tesis de licenciatura. Universidad de Chile. Acceso el 14 de agosto de 2019. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150685>.
- Asociación Mexicana de Energía Solar. 2018. «Centrales Solares en Operación – Diciembre 2018». Acceso el 29 de septiembre de 2019. <https://www.asolmex.org/es/centrales>.
- Banco Mundial. 2019a. «Global Solar Atlas». Acceso el 20 de diciembre de 2019. <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.523088,8.4375,3>.
- Banco Mundial. 2019b. «Solar resource maps of Mexico». Acceso el 4 de noviembre de 2019. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/mexico>.

- Barbuscia, Michele. 2017. «Economic viability assessment of floating photovoltaic energy». Tesis de maestría. Técnico Lisboa. Acceso el 14 de agosto de 2019. [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997257969/Thesis\\_Barbuscia\\_Michele%20\(85351\).pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997257969/Thesis_Barbuscia_Michele%20(85351).pdf).
- Boni Vicari, Matheus. 2012. «Uso de SIG e Análise Multicritério para Levantamento do Potencial de Implantação de Usinas Eólica e Solar no Rio Grande do Sul». Tesis de licenciatura. Universidade de Passo Fundo. Acceso el 14 de agosto de 2019. <http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2012-2/MATHEUS%20BONI%20VICARI.pdf>.
- Cámara Minera de México. 2011. *IV Seminario: Depósitos para Jales*. Acceso el 28 de septiembre de 2019. <https://www.camimex.org.mx/files/3514/3917/7321/2011-10-12.pdf>.
- Cámara Minera de México. 2012a. «Glosario: Minería metálica y no metálica». Acceso el 10 de septiembre de 2019. <https://camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-prensa/glosario/m/>.
- Cámara Minera de México. 2012b. «Sustentabilidad: Medio ambiente». Acceso el 22 de septiembre de 2019. <https://camimex.org.mx/index.php/secciones1/sustentabilidad/medio-ambiente/>.
- Cebecauer, Tomáš, Thomas Huld y Marcel Šúri. 2007. «Using high-resolution digital elevation model for improved PV yield estimates». Acceso el 19 de agosto de 2019. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=3DD7EC57F5DoCFF660C43F9784463C82?doi=10.1.1.600.8933&rep=rep1&type=pdf>.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2014. *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México*. México. Acceso el 4 de noviembre de 2019. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>.
- Choi, Yosoon y Jinyoung Song. 2016a. «Review of photovoltaic and wind power systems utilized in the mining industry». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75: 1386-1391. Acceso el 16 de julio de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.127>.
- Choi, Yosoon y Jinyoung Song. 2016b. «Sustainable Development of Abandoned Mine Areas Using Renewable Energy Systems: A Case Study of the Photovoltaic Potential Assessment at the Tailings Dam of Abandoned Sangdong Mine, Korea». *Sustainability* 8: 1-12. Acceso el 16 de julio de 2019. <https://doi.org/10.3390/su8121320>.
- Choi, Young-Kwan. 2014. «A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact». *International Journal of Software Engineering and Its Applications* 8: 75-84. Acceso el 16 de julio de 2019. <https://pdfs.semanticscholar.org/3384/odba6bb3f82ac68cde86fbbbae588a5bc180.pdf>.

- Ciel et Terre. 2018. «Aplicaciones del solar sobre agua: Cantera y mina». Acceso el 10 de diciembre de 2019. <https://ciel-et-terre.es/aplicaciones-del-flotante/>.
- Coll Hurtado, Atlántida, María Teresa Sánchez Salazar y Josefina Morales Ramírez. 2002. *La minería en México: geografía, historia, economía y medio ambiente*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Acceso el 2 de diciembre de 2019. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/82>.
- Comisión Europea. 2019a. «Photovoltaic Geographical Information System». Acceso el 20 de diciembre de 2019. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html#PVP](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP).
- Comisión Europea. 2019b. «Photovoltaic Geographical Information System: Country and regional maps: Germany». Acceso el 28 de noviembre de 2019. [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_index.html#!](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html#!).
- Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de la Biodiversidad. 2008, 2009, 2015 y 2017. «Portal de geoinformación». Acceso el 21 de diciembre de 2019. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Consejo Nacional de Población. 2012. «Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010». Acceso el 20 de diciembre de 2019. [http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices\\_de\\_Marginacion\\_2010\\_por\\_entidad\\_federativa\\_y\\_municipio](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indices_de_Marginacion_2010_por_entidad_federativa_y_municipio).
- Corporación Financiera Internacional. 2015. *Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants: A Project Developer's Guide*. Estados Unidos de América. Acceso el 8 de julio de 2019. [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/a1b3dbd3-983e-4ee3-a67b-cdc29ef900cb/IFC+Solar+Report\\_Web+\\_o8+o5.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kZePDPG](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/a1b3dbd3-983e-4ee3-a67b-cdc29ef900cb/IFC+Solar+Report_Web+_o8+o5.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kZePDPG).
- Eastman, John Robie. 2005. «Multi-criteria evaluation and GIS». Acceso el 19 de agosto de 2019. <https://pdfs.semanticscholar.org/7ee3/62272327b1da29f8e41b4efc7388606a5836.pdf>.
- Fernández Guerrero, Gerardo, ed. 2004. *Metodología de la Investigación*. México: Universidad de Londres. Acceso el 5 de diciembre de 2019. <https://es.slideshare.net/NASPTER8522/metodologia-investigacion-universidad-de-londres>.
- Ferrer Gisbert, Carlos, José Ferrán Gozávez, Miguel Redón Santafé, Pablo Ferrer Gisbert, Francisco Sánchez Romero y Juan Bautista Torregrosa Soler. 2013. «A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs». *Renewable Energy* 60: 63-70. Acceso el 18 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.04.007>.

- Franco González, Angélica Margarita. 2017. «Recursos Naturales 1». Clases dadas en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional Autónoma de México. Información no publicada.
- Fraunhofer ISE. 2015. *Current and Future Cost of Photovoltaics*. Alemania. Acceso el 18 de septiembre de 2019.  
[https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/AgoraEnergiewende\\_Current\\_and\\_Future\\_Cost\\_of\\_PV\\_Feb2015\\_web.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/AgoraEnergiewende_Current_and_Future_Cost_of_PV_Feb2015_web.pdf).
- Gabler, Hansjörg y Hans-Dieter Mohring. 2002. «Photovoltaische Großanlagen - Technologie und Realisierung». En *Solare Kraftwerke*, editado por ForschungsVerbund Sonnenenergie, 56-74. Acceso el 11 de julio de 2019.  
<http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2002/th2002.pdf>.
- Gasca Zamora, José. 2018. «Métodos de Análisis Regional». Clases dadas en el Instituto de Investigaciones Económicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Información no publicada.
- Gómez Mendoza, Leticia. 2018. «Climatología 2». Clases dadas en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional Autónoma de México. Información no publicada.
- Gómez Orea, Domingo. 2002. *Ordenación territorial*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Hanger, Susanne, Nadejda Komendantova, Boris Schinke, Driss Zejli, Ahmed Ihlal y Anthony Patt. 2016. «Community acceptance of large-scale solar energy installations in developing countries: Evidence from Morocco». *Energy Research & Social Science* 14: 80-89. Acceso el 27 de noviembre de 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.01.010>.
- Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo. 2003. *Abriendo Brecha*. Reino Unido. Acceso el 8 de diciembre de 2019.  
<https://pubs.iiied.org/pdfs/9287IIED.pdf>.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2018. «INECC reitera su compromiso ante el Acuerdo de París con rutas de mitigación al cambio climático». Acceso el 9 de septiembre de 2019.  
<https://www.gob.mx/inecc/prensa/inecc-reitera-su-compromiso-ante-el-acuerdo-de-paris-con-rutas-de-mitigacion-al-cambio-climatico>.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2015. «Tabla del Inventario Nacional de Emisiones de Gases Y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015». Acceso el 23 de agosto de 2019. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2018. «México en cifras: Zacatecas: PIB y Cuentas Nacionales». Acceso el 21 de diciembre de 2019.  
<https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/>.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2014. «Censos económicos: Sistema Automatizado de Información Censal (SAIC)». Acceso el 20 de diciembre de 2019. <https://www.inegi.org.mx/app/saic/default.aspx>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2013. «Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)». Acceso el 21 de diciembre de 2019. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2011. «Censo de Población y Vivienda 2010: Principales resultados por localidad (ITER)». Acceso el 20 de diciembre de 2019. [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Datos_abiertos).
- Laboratorio Nacional de Energía Renovable. «PVWatts® Calculator». Acceso el 20 de diciembre de 2019. <https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>.
- Labra Salgado, Omar Salim, Gibrán Rivera y Juan Ignacio Reyes García. 2017. «Análisis FODA sobre el uso de la inteligencia competitiva en pequeñas empresas de la industria del vestido». *Visión de Futuro* 21: 78-99. Acceso el 17 de diciembre de 2019. <https://www.redalyc.org/pdf/3579/357951171003.pdf>.
- León, Raymundo. 2016. «La planta solar más grande de México, abandonada». *La Jornada*, 15 de septiembre. Acceso el 11 de agosto de 2019. <https://www.jornada.com.mx/2016/09/15/estados/029n3est>.
- Liu, Luyao, Qinxing Wang, Haiyang Lin, Hailong Li, Qie Sun y Ronald Wennersten. 2017. «Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems». *Energy Procedia* 105: 1136-1142. Acceso el 14 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.483>.
- Moffat, Kieren y Airong Zhang. 2014. «The paths to social licence to operate: An integrative model explaining community acceptance of mining». *Resources Policy* 39: 61-70. Acceso el 27 de noviembre de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.11.003>.
- Momayez, Moe, Terril Wilson, Alex Cronin, Srikant Annavarapu y Bill Conant. 2009. «Research on an optimal site selection model for desert photovoltaic power plants based on analytic hierarchy process and geographic information system». Conferencia pronunciada por el American Society of Mining and Reclamation en Billings, Montana. Acceso el 12 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.21000/JASMR09010832>.
- Mundo Hernández, Julia, Benito de Celis Alonso, Julia Hernández Álvarez y Benito de Celis Carrillo. 2014. «An overview of solar photovoltaic in Mexico and Germany». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 639-649. Acceso el 5 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.029>.
- Nasirov, Shahriyar y Claudio Agostini. 2018. «Mining experts' perspectives on the determinants of solar technologies adoption in the Chilean mining industry».

- Renewable and Sustainable Energy Reviews* 95: 194-202. Acceso el 2 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.038>.
- Organización de Naciones Unidas. 2015. «Objetivos de desarrollo sostenible: Energía asequible y no contaminante». Acceso el 29 de julio de 2019. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
- Ortiz Pérez, Mario Arturo. 2019. *Apuntes de geografía física y del paisaje*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Acceso el 7 de octubre de 2019. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/157>.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. 2012. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Nueva York: Cambridge University Press. Acceso el 4 de agosto de 2019. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN\\_Full\\_Report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf).
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Ginebra. Acceso el 4 de agosto de 2019. [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf).
- Pearce, Joshua. 2002. «Photovoltaics – a Path to Sustainable Futures». *Futures* 34: 663-674. Acceso el 17 de agosto de 2019. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(02\)00008-3](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(02)00008-3).
- Pimentel da Silva, Gardenio Diogo y David Alves Castelo Branco. 2018. «Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts». *Impact Assessment and Project Appraisal* 36: 390-400. Acceso el 25 de noviembre de 2019. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1477498>.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. 2004. *Norma Oficial Mexicana: 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 postoperación de presas de jales*. México. Acceso el 27 de septiembre de 2019. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1317/1/nom-141-semarnat-2003.pdf>.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. 2011. *Norma Oficial Mexicana: Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*. México. Acceso el 27 de septiembre de 2019. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/134777/34.-\\_NORMA\\_OFICIAL\\_MEXICANA\\_NOM-157-SEMARNAT-2009.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/134777/34.-_NORMA_OFICIAL_MEXICANA_NOM-157-SEMARNAT-2009.pdf).
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. 2019. «Programa Nacional de Auditoría Ambiental». Acceso el 6 de diciembre de 2019. <https://www.gob.mx/profepa/acciones-y-programas/programa-nacional-de-auditoria-ambiental-56432>.

- Real Academia Española. 2019a. «Diccionario: Geografía». Acceso el 5 de noviembre de 2019. <https://dle.rae.es/?id=J7JqPLh>.
- Real Academia Española. 2019b. «Diccionario: Minería». Acceso el 2 de diciembre de 2019. <https://dle.rae.es/miner%C3%ADa>.
- Riquelme, Marcela y Álvaro Carreño. 2019. «Anglo American pone en marcha primera planta fotovoltaica construida sobre un relave minero en el mundo». Acceso el 22 de diciembre de 2019. [https://chile.angloamerican.com/medios/noticias/pr-2019/2019-03-14?sc\\_lang=es-ES](https://chile.angloamerican.com/medios/noticias/pr-2019/2019-03-14?sc_lang=es-ES).
- Rivera Hernández, Jaime Ernesto, Napoleón Vicente Blanco Orozco, Graciela Alcántara Salinas, Eric Pascal Houbron y Juan Antonio Pérez Sato. 2017. «¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto». *Revista Progreso y Sociedad* 15: 57-67. Acceso el 19 de noviembre de 2019. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1825>.
- Rodrigues, Sara, Mário Baptista Coelho y Pedro Cabral. 2017. «Suitability Analysis of Solar Photovoltaic farms: A Portuguese Case Study». *International Journal of Renewable Energy Research* 7: 243-254. Acceso el 6 de agosto de 2019. [https://www.researchgate.net/publication/320134552\\_Suitability\\_analysis\\_of\\_solar\\_photovoltaic\\_farms\\_A\\_Portuguese\\_case\\_study](https://www.researchgate.net/publication/320134552_Suitability_analysis_of_solar_photovoltaic_farms_A_Portuguese_case_study).
- Romero, Francisco Martín, María Aurora Armienta, Margarita Eugenia Gutiérrez y Guadalupe Villaseñor. 2008. «Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 24: 43-54. Acceso el 14 de agosto de 2019. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/21625/21621>.
- Rosa Clot, Marco, Guiseppe Marco Tina y Sandro Nizetic. 2017. «Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project». *Energy Procedia* 134: 664-674. Acceso el 18 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.585>.
- Rothen Véliz, Rodrigo Sebastián. 2015. «Inserción de energías renovables en plantas mineras». Tesis de licenciatura. Universidad de Chile. Acceso el 19 de agosto de 2019. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136245>.
- Sahu, Alok, Neha Yadav y Kumarasamy Sudhakar. 2016. «Floating photovoltaic power plant: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66: 815-824. Acceso el 6 de agosto de 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>.
- Sánchez Cabrera, Jorge Gonzalo. 2016. «Geografía Física 2». Clases dadas en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional Autónoma de México. Información no publicada.
- Sánchez Lozano, Juan, Jerónimo Teruel Solano, Pedro Soto Elvira y Socorro García Cascales. 2013. «Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria



- Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24: 544-556. Acceso el 12 de agosto de 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.019>.
- Sánchez Salazar, María Teresa. 2016-2017. «Geografía Económica 1». Clases dadas en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Información no publicada.
- Secretaría Nacional de Energía. 2018. *Balance Nacional de Energía 2017*. México. Acceso el 12 de septiembre de 2019.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf).
- Secretaría Nacional de Energía. 2016. *Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030*. México. Acceso el 30 de septiembre de 2019.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2016-2030.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2016-2030.pdf).
- Sen, Zekai. 2004. «Solar energy in progress and future research trends». *Progress in Energy and Combustion Science* 30: 367-416. Acceso el 14 de agosto de 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.004>.
- Servicio Geológico Mexicano. 2018a. *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2017*. México. Acceso el 25 de octubre de 2019.  
[http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario\\_2017\\_Edicion\\_2018.pdf](http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2017_Edicion_2018.pdf).
- Servicio Geológico Mexicano. 2018b. *Panorama Minero del Estado de Zacatecas*. México. Acceso el 11 de noviembre de 2019.  
<http://www.sgm.gob.mx/pdfs/ZACATECAS.pdf>.
- Servicio Geológico Mexicano. 2019. «Colección de Anuarios Estadísticos de la Minería Mexicana, 1989-2017». Acceso el 28 de junio de 2019.  
<http://www.sgm.gob.mx/Gobmx/productos/Anuarios-historicos.html>.
- Servicio Meteorológico Nacional. «Observatorio Sinóptico: Normales Climatológicas: Sombrerete, Zacatecas». Acceso el 20 de diciembre de 2019.  
<http://200.4.8.21/observatorios/historica/sombrerete.pdf>.
- Servicio Meteorológico Nacional. «Observatorio Sinóptico: Normales Climatológicas: Zacatecas (La Bufa), Zacatecas». Acceso el 20 de diciembre de 2019.  
<http://200.4.8.21/observatorios/historica/zacatecas.pdf>.
- Song, Jinyoung y Yosoon Choi. 2016. «Analysis of the Potential for Use of Floating Photovoltaic Systems on Mine Pit Lakes: Case Study at the Ssangyong Open-Pit Limestone Mine in Korea». *Energies* 9: 1-13. Acceso el 16 de julio de 2019.  
<https://doi.org/10.3390/en9020102>.
- Turney, Damon y Vasilis Fthenakis. 2011. «Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants». *Renewable and Sustainable*

*Energy Reviews* 15: 3261-3270. Acceso el 6 de agosto de 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>.

Universidad de Deusto. «Manual de estilo Chicago Deusto». *Revista Deusto* 126: I-XII.  
Acceso el 15 de julio de 2019. <http://www.deusto-publicaciones.es/deusto/pdfs/otraspub/otraspub07.pdf>.

Vargas Ulate, Gilbert. 2012. «Espacio y territorio en el análisis geográfico». *Reflexiones* 91: 313-326. Acceso el 5 de noviembre de 2019.  
<https://www.redalyc.org/pdf/729/72923937025.pdf>.

Xiao, Jianhua, Zhengyi Yao, Jianjun Qu y Jiahuan Sun. 2013. «Research on an optimal site selection model for desert photovoltaic power plants based on analytic hierarchy process and geographic information system». *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 5: 1-15. Acceso el 12 de agosto de 2019.  
<https://doi.org/10.1063/1.4801451>.