



UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO

**MAESTRÍA EN
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES**

**“Fitorremediación aplicada a la recuperación de
suelos en la tepetatera “Primavera” dentro de la Mina Pitalla en el
municipio de La Colorada, Sonora”**

**T E S I S
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES**

PRESENTA:

ECOL. JESÚS ALÁN AMADOR ROSAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. DANIEL MORALES ROMERO

Hermosillo, Sonora, Enero del 2020

**Fitorremediación aplicada a la recuperación de
suelos en la tepetatera “Primavera” dentro de la Mina Pitalla en el
municipio de La Colorada, Sonora**

TESIS

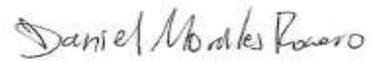
PRESENTA:

ECOL. JESÚS ALÁN AMADOR ROSAS

COMITÉ TUTORAL:

DR. DANIEL MORALES ROMERO

Director



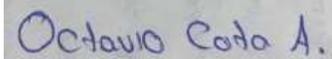
DRA. CARMEN ISELA ORTEGA ROSAS

Secretario



DR. OCTAVIO COTA ARRIOLA

Sinodal



Agradecimientos

Quiero hacer un agradecimiento muy especial mi asesor de tesis, Dr. Daniel Morales Romero primeramente por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto, por la confianza y paciencia brindada y el interés en el trabajo, en aquel entonces no tenía una idea clara de lo que quería hacer y gracias a la invitación pude aprender un poco más y llevar a cabo un proyecto que me ayudó a crecer personal y profesionalmente.

De igual manera agradecer a mis sinodales y anteriormente directora de tesis Dra. Carmen Isela Ortega Rosas por haberme apoyado desde clases y por tener siempre la disposición de apoyar en lo que fuera así como al Dr. Octavio Cota quien me brindo todo el apoyo en lo que se necesitara especialmente con el laboratorio de edafología y su instrumentaría.

Quiero agradecer especialmente a Compañía Minera Pitalla por haberme apoyado a lo largo de la maestría y siempre abrirme las puertas, especialmente a mi tecnólogo Alberto Orozco por el apoyo brindado y los ánimos en la primera exposición, además de haber dejado a cargo de mi a dos personas que fueron de gran apoyo, Lourdes Mc Pherson también tecnóloga y a David Rivera, sin duda no pude caer en mejores manos, muchísimas gracias por todo el apoyo y por la disposición que tuvieron conmigo.

Así mismo agradecer a todas las personas dentro de las instalaciones, fue un gusto poder haber estado allí. Igualmente un agradecimiento al capi que siempre me llevaba puntual al sitio de trabajo.

A Rocío de posgrado por siempre estar pendiente de cualquier situación y viendo que no nos faltara nada.

Gracias a mi mamá por apoyarme en el proceso, que si bien es mucho o poco fue una experiencia muy retadora para mí se que estarías dispuesta a apoyarme en lo que fuera, te amo.

A mi papá que, aunque sea una evento más al que no puede estar se que de haber podido lo habría hecho y habría estado desde el principio, te amo, ojalá te sientas orgulloso.

Quiero darle las gracias a Karla, mi novia, siempre apoyándome y dándome ánimos incluso cuando soy pesimísta, definitivamente has sido un apoyo incondicional y una de las principales razones e inspiraciones para poder titularme como MSPB, te amo muchísimo y de corazón muchas gracias por estar allí siempre. De igual manera quiero agradecer a toda tu familia, a tu mamá por siempre abrir las puertas de su casa y su amabilidad, preocupación, a tus hermanas y hermano, así como a todos sus hijos, gracias a todos por el apoyo todo este tiempo y por recibirme como uno más de ustedes, por supuesto que también a la Sofí aunque esté chiquita, siempre me hace reír y me busca para jugar.

Quisiera darle las gracias a mi prima Crisbel y su esposo Carlos y su familia que me apoyaron cuando me hacía falta dándome la oportunidad de trabajar en su negocio, donde he pasado ratos muy agradables y divertidos y conocido excelentes personas.

A mis compañeros de trabajo, Carlos que ya no está ahí, Karla, Luna, Lynette, Salma, Sofía, Paulina y Oscar y a todo Borges en general, en especial al mejor equipo, el nocturno por supuesto, Rubén, Miguel, Majo y por supuesto yo, he reído mucho con ustedes y me atrevo a decir que no solo son compañeros si no amigos, muchas gracias.

Contenido

RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1. Descripción del problema de estudio	13
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo General	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	15
CAPITULO 2 ANTECEDENTES	17
2.1 Minería a cielo abierto	17
2.1.1 Etapas de minería.....	17
2.1.2 Prospección	18
2.1.3 Exploración.....	18
2.1.4 Evaluación del proyecto (estudio de factibilidad).....	18
2.1.5 Desarrollo y construcción.....	19
2.1.6 Producción	19
2.1.7 Cierre de mina	20
2.2 Minería en México	20
2.3 Minería en Sonora.....	22
2.4 Impactos de la actividad minera	24
2.4.1 impactos negativos de la minería	25
2.4.2 Impactos positivos de la minería.....	27
2.5 Biorremediación.....	28
2.5.1 Ventajas y desventajas de la biorremediación.....	29
2.7.1 Fitorremediación.....	31
2.7.2 Bioventing	31
2.7.3 Bioaumentación	31
2.7.4 Bioesparción.....	32
2.7.5 Bioestimulación.....	32
CAPITULO 3 METODOLOGÍA	33
3.1 Descripción del área de estudio	33
3.1.1 Vegetación.....	36

3.1.2 Especies emblemáticas	36
3.1.3 Fauna	37
3.1.4 Hidrología	38
3.1.5 Geología	41
3.1.6 Edafología.....	43
3.1.6.1 Litosol	43
3.1.6.2 Xerosol.....	43
3.1.6.3 Regosol	44
3.1.6.4 Fluvisol.....	45
3.1.6.5 Gleysol	45
3.2 Hipótesis.....	46
3.3 Metodología	46
3.3.1 Trabajo de campo.....	46
3.3.2 Diseño experimental	47
3.4 Caracterización del sustrato.....	48
3.5 Análisis estadístico	49
3.6 RESULTADOS	50
3.6.1 Germinación de plántulas	50
3.6 Geoquímica del suelo	58
3.7 Discusión	61
3.7.1 Germinación.....	61
3.7.2 Supervivencia	63
3.7.3 Tratamientos control, top soil y fertilizante.....	64
3.7.4 Geoquímica del suelo	66
3.8 Conclusiones	67
4 Bibliografía	70
5 Anexos.....	81

Índice de figuras y tablas.

Figura 1.- Localización del sitio de estudio	35
Tabla 1.- Especies con estatus de protección sitio	38
Figura 2.- Carta hidrológica de Sonora.	40
Figura 3.- Carta geológica de Sonora.....	42
Tabla 2.- Análisis estadístico de germinación.....	51
Figura 4.- Porcentaje de semillas germinadas bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) control (a y b), 2) y top soil (c y d).....	52
Figura 5.- Porcentaje de semillas germinadas bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) fertilizante (a y b), 2) y top soil-fertilizante (c y d)	53
Tabla 3.- Análisis estadístico de la supervivencia para las cuatro especies de estudio	55
Figura 6.- Porcentaje de supervivencia bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) control (a y b), 2) y top soil (c y d).....	56
Figura 7.- Porcentaje de supervivencia bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) fertilizante (a y b), 2) y top soil-fertilizante (c y d).	57
Fig. 8. Concentración elemental en muestra total (M.T.) para los sitios de tepetate	59
Fig. 9. Concentración elemental en muestra total (M.T.) para los sitios de top soil.	59
Fig. 10. Gráficas de Concentración elemental en muestra total (M.T.) de los elementos mayores para los sitios de tepetate.	60
Fig. 11. Gráficas de Concentración elemental en muestra total (M.T.) de los elementos mayores para los sitios de top soil.	60

RESUMEN

La extracción de minerales como el oro y la plata a través de la minería moderna ha provocado grandes pérdidas de vegetación natural y un impacto directo en la biodiversidad. Con ello, los cambios generados en el ambiente influyen considerablemente en el cambio climático a una escala global. En nuestros días, las técnicas de trasplante para la recuperación de áreas desprovistas de vegetación se ha vuelto una técnica tradicional que en ocasiones carece de éxito debido a una mala planeación. Asimismo, el éxito en la supervivencia de plantas en la mayoría de los casos resulta deficiente debido a una mala selección del lugar. En este trabajo se explora el establecimiento de especies de plantas leguminosas nativas a partir de semilla en el sustrato rocoso de la tepetatera Primavera, en la Mina Pitalla, La Colorada, Sonora. Se colectaron semillas de 4 diferentes especies leguminosas nativas de la región y se pusieron a prueba técnicas de escarificación manual. Las semillas fueron situadas en diferentes tratamientos colocados en la parte superior de la tepetatera donde se evaluó la germinación y emergencia de plántulas. Asimismo, se exploraron tratamientos utilizando suelo superficial recuperado y un fertilizante comercial. Los resultados indican que la germinación ocurrió en un porcentaje superior al 75% en los tratamientos donde las semillas fueron escarificadas. Por su parte, la supervivencia de plántulas luego de un año fue mayor en el tratamiento control con un porcentaje que supera el 50% a diferencia del resto de los tratamientos. Los resultados obtenidos son discutidos en términos de su aplicación para desarrollar técnicas de remediación en lugares impactados por actividad minera.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo geológico, Sonora ha sido afectado por eventos tectónicos de gran importancia los cuales emplazaron una gran cantidad de depósitos minerales. Debido a esto el potencial geológico-minero en el estado ha sido muy amplio y favorable, teniendo posibilidades de localizar nuevos yacimientos minerales de interés económico, ya que aún existe una gran cantidad de zonas geológicamente prospectivas, que justifican realizar trabajos de mayor detalle (SGM, 2017). Bajo este supuesto, la minería ha sido reconocida como una de las actividades productivas de mayor impacto.

La minería es reconocida como una actividad económica primaria ya que los minerales se extraen directamente de la Tierra, sin estar procesados previamente por el hombre, y consiste en la extracción de diferentes tipos de minerales presentes en o cerca de la superficie de la Tierra (Monreal & Hernández, 2015). Esta actividad juega un papel vital en el desarrollo económico de muchos países, el desarrollo mineral es un factor económico que favorece al crecimiento, que si es desarrollado de manera responsable, puede ser un catalizador para el crecimiento social de los países (Walser, 2005). En el mundo, la minería se compone fundamentalmente de productores de cobre, oro y plata. Aunque la minería es considerada como una actividad históricamente importante, en las últimas décadas se ha constituido en uno de los sectores más dinámicos de la economía mundial. La minería genera múltiples impactos positivos, uno de los impactos más importantes puede ser medido en cuanto a términos de empleo y generación de

ingresos. A escala comercial, se ha documentado que la minería provee empleo y transferencia de habilidades a más de 2 millones de trabajadores (Walser, 2005).

Entre otros beneficios la minería es responsable de:

- Cambios sectoriales: Entre 1989 y 2001, más de 75 países liberalizaron su régimen de minería, aceites y explotación de combustibles y privatizaron la minería lo cual incremento la cantidad de inversiones extranjeras de las compañías mineras desarrollando a los países (BSR, 2010).²
- Los proyectos mineros pueden contribuir al desarrollo a través de varias maneras, desde generación de empleos y pago de impuestos hasta inversiones locales para proyectos en una comunidad (Wall, 2011)².
- Aportes sociales: Las compañías mineras pueden trabajar en colaboración con las comunidades locales a través de fundaciones gubernamentales para realizar proyectos de desarrollo (Wall, 2011)²
- Servicios públicos: Cada vez más los proyectos mineros se desarrollan en regiones fronterizas y alejadas de los servicios públicos del gobierno como agua, sanidad y electricidad, esta responsabilidad de proveer dichos servicios suele caer en manos de las compañías mineras (Wall, 2011).

En México, el cierre de minas involucra una serie de actividades diversas entre las cuales destaca la rehabilitación de las áreas donde fueron llevados a cabo diversos procesos de las operaciones mineras. En dicha fase es necesario asegurar la estabilización física y química en cada una de las secciones, cumpliendo así con la normatividad vigente. El uso de técnicas de fitorremediación pueden ser empleadas para disminuir los impactos mineros siendo ésta mas

económica que otro tipo de remediaciones tradicionales (Ali et al. 2013). Estos procesos consisten en renovar la estabilidad del ecosistema y su resiliencia después de un estrés o disturbio con respecto a su salud, integridad y sustentabilidad (SER, 2002).

En Sonora, una práctica común para llevar a cabo lo anterior es la preparación del terreno, extender la cobertura del suelo orgánico, y posteriormente el trasplante de especies nativas. Sin embargo, durante el proceso de trasplante existe un riesgo muy amplio de fracaso por diversas causas (mala adaptación al lugar, estrés de la planta, daño radicular, etc.) sin garantizar el establecimiento exitoso de plantas, aunado a esto los sistemas de trasplante convencionales muestran costos muy elevados y el tiempo de ejecución es mayor (Omeñaca et al, 2012). No obstante, una alternativa para asegurar el establecimiento y supervivencia de la planta es la germinación de la semilla en el lugar. Para ello, resulta necesaria la exploración de diversas técnicas que garanticen la germinación de la semilla y el establecimiento en el lugar deseable.

En el caso de la Compañía Minera Pitalla, ubicada a 40 kilómetros al este de Hermosillo, Sonora, que data del siglo XVIII. Se interesa por realizar acciones de restauración y biorremediación para mitigar sus impactos en el proceso de producción y recuperación de oro y plata. La operación de la mina lleva 4 años consecutivos obteniendo el galardón de empresa socialmente responsable (ESR) por haber destacado a nivel nacional por su manejo del recurso humano, protección al ambiente y atención a las comunidades. En el lugar, su primera operación fue subterránea de 1860 a 1916 y la segunda fue un pozo a cielo abierto de 1994 hasta la actualidad. Minera Pitalla genera 600 empleos directos e

indirectos y se encarga de capacitar a todos sus empleados en cuestiones de seguridad y manejo de residuos, gracias al trabajo colectivo de toda la producción anual de oro y plata, alcanza una cifra de 55,000 onzas (ARGONAUT GOLD, 2015). Como ESR, Minera Pitalla tiene como objetivos principales Impulsar la participación y empoderamiento de la comunidad, mediante acciones que garanticen su calidad de vida, así como promover la participación e involucramiento de los ciudadanos en actividades que coadyuven al fortalecimiento del tejido social a través de organizaciones de la sociedad civil, Gobierno Municipal, Gobierno Estatal y Gobierno Federal y vincular a la Compañía con organizaciones de la sociedad civil, con instituciones públicas y privadas para el aprovechamiento de la transversalidad y la colaboración en objetivos conjuntos (ARGONAUT GOLD, 2018).

Dado lo anterior, en el presente trabajo se pretenden realizar actividades de biorremediación, a través del establecimiento de especies vegetales nativas en la tepetatera, zona conformada por todo aquel material que luego del proceso de trituración no tiene concentraciones deseables del mineral que la mina busca. El área de trabajo se conoce como tepetatera "Primavera" y se encuentra en las instalaciones de la Compañía Minera Pitalla, municipio de La Colorada, Sonora. En el lugar, se establecerán diversos tratamientos para explorar métodos que evalúen la germinación y garanticen la supervivencia de especies leguminosas nativas utilizando técnicas de escarificación in-situ, fundamentado en el conocimiento de los atributos y bondades en las especies seleccionadas que alcancen el éxito en la sucesión ecológica en el lugar.

CAPITULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema de estudio

La actividad minera hace una contribución importante a la economía Mexicana: proveen empleo, realizan actividades comunitarias y mejoras de infraestructura en la comunidad, entre otros. Sin embargo esta industria genera residuos que contaminan el suelo, el agua y el aire. Dichos residuos generalmente contienen químicos corrosivos y metales pesados los cuales necesitan un tratamiento previo para prevenir impactos negativos en la salud poblacional (INEGI, 2014). Asimismo, es reconocido que las actividades mineras generan perturbaciones en las comunidades de vegetación natural. Grandes extensiones de suelo y vegetación llegan a ser removidas con la finalidad de establecer proyectos mineros, dichas áreas desmontadas son destinadas para almacenar aquel material extraído cuya riqueza mineral es menor al costo de procesamiento, por tanto, supone una pérdida económica el procesarlo.

En el caso particular de la etapa de cierre de la Compañía Minera Pitalla, se pretende restablecer la cobertura vegetal a través de técnicas de fitorremediación en el área de tepetateras. Estas áreas donde antes había vegetación nativa y comunidades de fauna fueron drásticamente perturbadas al inicio del proyecto y no pueden rehabilitarse dentro de un tiempo razonable por procesos naturales de sucesión (Rani et al, 2018). Dado lo anterior, las técnicas de fitorremediación son

una excelente oportunidad para agilizar este proceso y garantizar en el corto plazo el éxito en el establecimiento de plantas nativas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Explorar la germinación y establecimiento de especies nativas leguminosas en la tepetatera “Primavera” en la Compañía Minera Pitalla, mediante la evaluación de diferentes tratamientos de establecimiento con el fin de conocer que especie y/o tratamiento resulta ser el más eficaz para llevar a cabo procesos exitosos de fitorremediación en el lugar.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la germinación y crecimiento de especies leguminosas nativas en parcelas experimentales establecidas mediante tratamientos de escarificación y uso de diversos sustratos en la tepetatera “Primavera”.
- Evaluar la tasa de supervivencia o permanencia de especies leguminosas nativas en la tepetatera “Primavera”.
- Realizar una caracterización geoquímica de los sustratos utilizados.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los impactos de la actividad minera varían en dimensiones y efectos, uno de los impactos más importantes es la remoción de vegetación nativa para el establecimiento de las necesidades del proyecto minero, donde en algunos casos las áreas quedan desprovistas de vegetación por algunos años. Una de las formas de mitigar estos impactos es el uso de técnicas de fitorremediación, que pueden ser usadas para tratar de restablecer las condiciones originales de la vegetación y estas técnicas son más económicas que otros tipos de remediaciones (Ali et al. 2013).

La fitorremediación se basa en el principio de usar los procesos bio-regenerativos que ocurren naturalmente en el ecosistema para remediar sitios contaminados o recuperar extensiones de suelo (Rani, 2018). Sin embargo, a pesar de haberse desarrollado diversas técnicas, éstas no logran tener éxito por diversos factores (malas selecciones del lugar, semillas en mal estado, mal establecimiento, etc.) además los sistemas de trasplante convencionales son de elevados costos y el tiempo de ejecución es mayor (Saiz et al, 2012).

Por esta razón, la empresa ARGONAUT GOLD se interesa en desarrollar el presente proyecto para minimizar sus impactos negativos al medio ambiente. En el presente trabajo, se propone el establecimiento de especies nativas clave del lugar en las áreas de tepetate debido a que estas zonas están actualmente sin uso,

son propicias para trabajar debido a que no hay movimiento vehicular y también son futuros puntos de remediación de la mina. Dado que la fitorremediación está basada en plantas, su efectividad dependerá de las propiedades de las plantas que se utilicen. Una de las propiedades más importantes que las plantas deben tener son: habilidad para producir biomasa rápidamente, y en el caso de remoción de metales pesados que tengan la habilidad de absorber grandes cantidades de estos (Lekic, 2017). Dichas especies serán seleccionadas considerando sus bondades ecológicas (especies leguminosas, nodrizas, formadoras de microclimas, etc.) y facilidad en su germinación y establecimiento. Otras de las bondades importantes que las plantas deben tener es que sean tolerantes a suelos con condiciones alternas (pH, salinidad, estructura, contenido hídrico), la generación de sistemas de raíz densos, la facilidad de establecimiento y reproducción y resistencia a pestes y enfermedades (Lekic,2017). Se seleccionarán cuatro especies de leguminosas del Desierto Sonorense consideradas con bondades que sobresalen dentro del ecosistema nativo. Para ello se evaluará la germinación, el crecimiento y la supervivencia como indicadores de éxito. El uso de plantas nativas ofrece muchas ventajas, entre ellas la adaptación a condiciones ambientales locales, lo cual podría limitar la introducción de especies invasoras que afectan a las comunidades de plantas locales. Además, las técnicas empleadas en este trabajo servirán a la empresa para su aplicación en futuros proyectos sin mencionar que, al estar este método basado en atenuación natural, el público lo considera más aceptable que otras tecnologías o métodos (Vidali, 2001).

CAPITULO 2 ANTECEDENTES

En México, y como consecuencia de varios siglos de actividad minera, la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, han producido grandes cantidades de residuos peligrosos difíciles de cuantificar (Martínez et al. 2011). Se sabe que, en 1999, de acuerdo a cifras publicadas por el INEGI-INE (2000), los sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, ascendían a varios miles de lugares y éstos eran equivalentes a 25967 km² de superficie de suelo degradado.

2.1 Minería a cielo abierto

La minería superficial es un tipo de actividad que se enfoca en extraer minerales cerca de la superficie, esto removiendo las capas de roca y suelo en la superficie (Harraz, 2010). La minería a cielo abierto debe tomar en cuenta varios factores como lo son la geografía, el estado legal de la tierra y sus derechos, factores históricos y políticos, la geología, los requerimientos para el tratamiento del mineral y un análisis económico (Harraz, 2010)

2.1.1 Etapas de minería

La minería es una actividad que consta de varias etapas, estas son, prospección, exploración, estudio de factibilidad, desarrollo y construcción, producción y explotación y cierre.

2.1.2 Prospección

La prospección es una etapa que tiene como objetivo lograr el conocimiento general del área de interés geológico localizando anomalías en la corteza terrestre donde posiblemente pueda existir un depósito mineral (Peñailillo, 2009).

2.1.3 Exploración

Esta consiste en lograr un conocimiento detallado del depósito mineral descubierto en la etapa anterior pero limitado a un área más restringida con el fin de establecer cuáles son las dimensiones exactas y el valor del depósito mineral, en esta etapa se define la decisión de continuar, dicha decisión se obtiene a través de un estudio de prefactibilidad (Peñailillo, 2009).

La exploración usualmente involucra la colecta de datos de diversos equipos multidisciplinarios como lo son geofísicos, geoquímicos y geólogos (Suorineni, 2015).

2.1.4 Evaluación del proyecto (estudio de factibilidad)

En esta etapa se realiza un estudio técnico-económico del proyecto, si dicho estudio resulta positivo hay presencia de mina. Llegado a este punto, la empresa toma la decisión de invertir teniendo en consideración varios factores como lo son las condiciones políticas del país, el resultado económico del estudio de factibilidad, es decir que este sea atractivo y rentable, la aprobación del Estudio de Impacto Ambiental por las instancias correspondientes de cada país, y la legal posesión de las propiedades mineras y superficiales (Peñailillo, 2009).

2.1.5 Desarrollo y construcción

En minas a cielo abierto se realiza un trabajo llamado pre-stripping cuyo objetivo es extraer la roca sin valor comercial que cubre las reservas minerales, el objetivo de esta etapa es desarrollar las actividades necesarias para alcanzar el cuerpo mineralizado y asegurar la alimentación sostenida del mineral a la planta de proceso. En esta fase se establecen las instalaciones para las construcciones pertinentes que permitan el desarrollo de la mina (Peñailillo, 2009).

2.1.6 Producción

Esta es la etapa donde comienzan los procesos de producción de la mina en base a los requerimientos establecidos en los planes de producción, esta fase está compuesta por 4 etapas, extracción, procesamiento, fundición y refinación:

1. Extracción: El mineral viaja desde la mina hasta la planta de procesamiento. Su extracción involucra subprocesos como la perforación, tronadura de roca, carguío y transporte a su destino.
2. Procesamiento: El material extraído pasa por varios procesos físicos que reducen su tamaño con el fin de liberar las partículas metálicas contenidas en la roca, acto seguido la concentración de dichos metales (contenido metálico) se aumenta mediante procesos físico-químicos. En este punto es cuando el tepetate se forma, al no tener cantidades deseables del mineral extraído, este es acumulado a las orillas de la mina.
3. Fundición: Consiste en la separación de los concentrados obtenidos del proceso anterior.

4. Refinación: Los metales obtenidos de la fundición son purificados, su objetivo es obtener un metal con un grado de pureza tal que sea apto para su transformación industrial. (Peñailillo, 2009).

2.1.7 Cierre de mina

La mejor forma de dejar un legado positivo en la actividad minera es comenzando el proyecto por el final (diseñar para el cierre). El cierre de mina es la última fase del ciclo minero, consiste en la preparación y ejecución de actividades necesarias (desde el inicio de las operaciones) para restaurar las áreas afectadas por la explotación minera (Peñailillo, 2009), este incluye el cese de operaciones, el reclamo de los sitios mineros, incluyendo la rehabilitación ambiental, los daños sociológicos y abandono de sitio (McHaina 2001, Solomon 2008).

2.2 Minería en México

México es un país minero, ya que es productor de varios minerales primarios, 6 estados destacan su producción mineral, los principales estados mineros son: Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Coahuila, San Luis Potosí y Durango. La minería ha sido el recurso más importante del país y el fundamento de su riqueza desde el tiempo del descubrimiento de América, y el hecho de que hoy ocupe uno de los primeros lugares en el mundo por su producción de diversos metales (Saavedra & Hernández Rabagó, 2015). Antes de la llegada de los españoles al nuevo mundo, los habitantes del territorio que hoy ocupa México, ya se realizaba algún tipo de minería, ya sea para herramientas o por cuestiones ornamentales. En la pequeña población minera de Cópala, Sinaloa, se encontró en una galería de una antigua

mina, varias herramientas antiguas entre ellas algunas barretas, cuñas, picos y martillos, es probable que los métodos mineros de los antiguos mineros centroamericanos no hayan sido obtenidos de los europeos (Saavedra & Hernández Rabagó, 2015). Durante la colonia Española, la minería fue la principal actividad económica y fue un factor muy importante durante la conquista, siendo el oro y la plata los principales productos que se enviaban de México a España, esta actividad fue un detonante e incentivo en la exploración de nuevas áreas, dando como resultado la expansión del territorio principalmente al norte de México, debido a la riqueza mineral de México los Españoles se vieron incentivados a conquistar, explorar y colonizar nuevos territorios, siendo de las principales minas de Nueva España Zacatecas en 1546, Pachuca en 1552, Fresnillo y Guanajuato en 1554 y finalmente San Luis Potosí en 1592 (Saavedra & Hernández Rabagó, 2015). Hace poco más de 300 años minerales como el oro, plata, cobre, hierro, plomo, estaño, mercurio, azufre y carbón ya eran explotados en estados como Aguascalientes, Baja California, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas. En el período de 1788-1809 una de las minas de Guanajuato, La Valenciana llegó a producir 30 millones de pesos de plata. (Saavedra & Hernández Rabagó, 2015). En México la minería dio origen a poblaciones y ciudades a lo largo del territorio, incluso surgieron municipios por dicha actividad, pero que desaparecieron al cerrar las minas, propició la generación de la agricultura, ganadería y comercio alrededor de los centros mineros. Asimismo, gracias a la actividad minera se establecieron caminos y redes

ferroviarias que ayudaron a las necesidades de transporte, se fundaron las casas de moneda en México, Chihuahua, Sonora, Durango, Guadalajara, Guanajuato, Oaxaca y Zacatecas. De 1760 a 1761 se establecieron las Reales Ordenanzas de minería que regulan dichos los trabajos de dicha actividad, en 1792, se estableció la primera casa de las ciencias: El real seminario de minería en México (Saavedra & Hernández Rabagó, 2015). En 2017 la minería en México mostró un repunte aceptable gracias a una importante reducción de costos y mejora en eficiencia operativa, además de que el producto interno bruto minero registró un incremento de 4% con respecto al año anterior (SGM, 2018). De acuerdo con el Mineral Commodity Summaries (USGS), en 2017, México ocupó el octavo sitio en la producción de oro, la producción minera nacional anualizada de oro reportó una disminución de 4.22% con respecto al 2016, alcanzando un total de 4.08 millones de onzas; permitiendo que México se mantenga entre los principales países productores de oro en el mundo.

2.3 Minería en Sonora

El estado de Sonora fue una de aquellas regiones mineras que vivieron la segunda guerra mundial lo que lo llevó a exportar, beneficiándose del enorme incremento en el consumo de metales y minerales generado por la demanda bélica, las grandes minas de cobre de Cananea y Nacozari reactivaron sus añejos socavones para satisfacer la demanda (Sierra, Enriquez, & Almada, 1997). En México existen vestigios que desde el Mioceno existía un grupo de pobladores llamados Clovis, estos elaboraban sus famosas puntas de roca en Sonora (Saavedra y Rábago, 2015). En el estado, las misiones jesuitas fueron los primeros asentamientos de

esta parte de la Nueva España, el crecimiento de estas villas fue favorecido por la exploración y producción de metales preciosos, constituyéndose, desde entonces hasta las primeras décadas de este siglo, en el eje rector de la economía sonoreense. Álamos es el ejemplo clásico del origen y florecimiento de los pueblos coloniales al amparo de la actividad minera (Sierra, Enriquez, & Almada, 1997). A finales del siglo XIX la inestabilidad de los mercados tuvo consecuencias interesantes, los precios del oro y plata cayeron un 2% anual durante el porfiriato, en 1905 la actividad minera de Álamos quedó reducida a 5 minas, sin embargo la minería sonoreense, lejos de desaparecer se vio fortalecida, el estado de Sonora registró una acelerada expansión: de 1880 a 1910, la población prácticamente se duplicó y poco a poco los yacimientos minerales en el estado se transformaron en centros de intensa actividad económica (Sierra, Enriquez, & Almada, 1997).

En 1891 Cananea ya contaba con 100 habitantes y para 1900 su población ascendía a cerca de 900, mientras que para 1905 y gracias al surgimiento del emporio de Green se registró a más de 20 mil habitantes, convirtiéndose en la ciudad más populosa e importante durante los primeros años del siglo. No solo Cananea se vio beneficiada por la fiebre minera, la economía y población de Moctezuma presentó un crecimiento notable, al igual que las minas situadas en Nacozari y Pilares en las cuales se observó un incremento en el beneficio mineral llegando a laborar 2000 trabajadores. Esta actividad fue la fuente de prosperidad y riqueza en de Sonora. Este auge minero finalizó con la crisis mundial de 1929-1932 ya que de esta se derivaron reducciones en los mercados de exportación, así como los precios del cobre, principal mineral producido en sonora, de aquí la

importancia de la agricultura en la economía de (Sierra, Enriquez, & Almada, 1997). Sonora fue una de aquellas regiones mineras que vivieron la segunda guerra mundial bajo la buena estrella del auge exportador, beneficiándose del enorme incremento en el consumo de metales y minerales generado por la demanda bélica. Las grandes minas de cobre de Cananea y Nacozari reactivaron sus añejos socavones para responder a una demanda ilimitada (Contreras & Ramírez, 1988). En el periodo de 1970 a 1990 se observó una reactivación minera a tal grado que, desde finales de los años setenta, una larga lista de empresas comenzaron trabajos de exploración, construcción, explotación y beneficio con un vigor comparable al de los primeros 30 años del siglo. Debido a su magnitud destacan las siguientes empresas: Compañía Minera de Cobre S.A., en La Caridad (municipio de Nacozari); la Compañía Minera Lampazos S.A. de C.V. en Lampazos (municipio de Tepache); la Compañía Minera de Cumbobabi, S.A. de C.V. en Cumpas; La Compañía Minera La Negra y Anexas, S.A. de C.A. en San Bernardo (municipio de Álamos) y la empresa Barita de Sonora, S.A. en Mátape (Villa Pesqueira). Junto a estas seis grandes empresas, por lo menos otras 20 de menor tamaño emprendieron operaciones, acumulando una inversión cercana a los 35 mil millones de pesos a precios de 1980 (Contreras, 1986).

2.4 Impactos de la actividad minera

La búsqueda de nuevos materiales ha sido siempre una constante en la vida de las sociedades de todos los tiempos. Los minerales y rocas nos proporcionan la mayoría de los materiales que usamos hoy en día, ya que estos se utilizan en la construcción de viviendas, en los muebles y equipos que usamos diariamente, en

la fabricación de vidrio y de pinturas, como objetos ornamentales, en joyería y en muchos otros artículos que utilizamos todos los días (Hernández, 2015). No obstante, la actividad minera involucra una serie de impactos tanto positivos como negativos.

2.4.1 impactos negativos de la minería

La actividad minera y la materia prima derivada de ella son de suma importancia para sustentar una buena calidad de vida. Sin embargo, también tiene impactos negativos en ella. Primeramente, los impactos en la salud pública, estos se ven comprometidos por el uso de sustancias peligrosas y desechos con frecuencia los problemas de salud pública relacionados con las actividades mineras incluyen: Agua: Contaminación de las aguas superficiales y subterráneas con metales, elementos, microorganismos provenientes de desagües y desechos en los campamentos y residencias de los trabajadores.

Aire: Exposición a altas concentraciones de dióxido de azufre, material particulado, metales pesados, incluyendo plomo, mercurio y cadmio.

Suelos: Precipitación de elementos tóxicos suspendidos en las emisiones atmosféricas. Estos pueden causar o contribuir al incremento de la mortalidad o de una seria e irreversible enfermedad, también es un potencial peligro para el ambiente si esta no es correctamente tratada, almacenada, transportada o manejada (Gajic 2010).

Entre los impactos más notables y potenciales de la minería se encuentran la completa destrucción de un recurso, la degradación o destrucción de lugares de

valor cultural dentro o fuera del sitio de operaciones, esto debido al cambio en los patrones hidrológicos o topográficos, el movimiento de tierras etc., aunado a esto se encuentran los impactos visuales causados por la remoción de la vegetación así como la alteración al suelo causada por explosiones, excavaciones y la presencia de maquinaria pesada (Gajic, 2010).

En cuanto a contaminación ambiental uno de los impactos más notables es en la calidad del aire el cual se ve afectado por fuentes móviles, estacionarias y por emisiones fugitivas. Las fuentes móviles incluyen vehículos pesados utilizados en las distintas operaciones de excavación, los vehículos de personal y de transporte de materiales también contribuyen en la calidad del aire, cabe destacar que estas fuentes dependen del combustible y las condiciones del equipo y aún si algunas de estas fuentes son mínimas la cantidad de emisiones en conjunto constituyen una preocupación y problemática muy grande (Gajic, 2010). Las fuentes estacionarias son aquellas que están fijas en un sitio, es decir instalaciones que utilizan combustibles tales como las que se encargan de generar energía, instalaciones de secado, fundición etc., esto debido a que la producción de metales preciosos requiere de la realización de procesos de fundición, los cuales suelen producir niveles elevados de diversos gases (Gajic, 2010). La Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (EPA) define como emisiones fugitivas a todas aquellas emisiones que razonablemente no se pueden conducir a través de una chimenea, conducto de ventilación y otras aperturas funcionalmente equivalentes, siendo para un proyecto minero las más frecuentes las de almacenamiento y manipulación de materiales, procesos mineros, fugas de polvos, actividades de

construcción y caminos asociados con el proyecto, pilas y lagunas de lixiviación, depósitos de diversos materiales y escombros (Gajic, 2010). La contaminación por ruido se asocia a motores de vehículos de cualquier índole, voladuras, generación de energía etc., y estas pueden llegar a afectar la calidad de vida de las poblaciones aledañas y la vida silvestre (Gajic, 2010). Dicho impacto se denomina pérdida de hábitat, las especies silvestres y su supervivencia dependen de diversos factores tales como la condición del suelo, clima local, altitud y otros factores que definen su hábitat, sin embargo, la minería causa daños indirectos y directos que alteran estos factores, forzando el desplazamiento de las especies y la pérdida de vegetación, fragmentación del hábitat, e incluso en algunos casos el desplazamiento humano (Gajic, 2010).

2.4.2 Impactos positivos de la minería

Si bien la minería es una actividad con repercusiones sociales y ambientales, también puede ser un excelente contribuidor a la economía de un país, además de ser bien implementado lo propuesto en la EIA los impactos ambientales pueden ser remediados con éxito asemejando las condiciones naturales que existían antes del comienzo de las actividades. La incursión y desarrollo de esta actividad es una verdadera ventaja al desarrollo económico de la sociedad, ya que a través de la historia la minería ha generado múltiples beneficios como ciudades, carreteras, redes ferroviarias y de comunicaciones, redes de agua potable, electrificación y captación de tecnología, infraestructura y apoyos a las comunidades, así como la remediación de los sitios utilizados para la actividad (CAMIMEX, 2006). Para la minería las relaciones sociales con las comunidades son de suma importancia, la

salud y la educación son rubros muy importantes ya que es fundamental para las operaciones mineras brindarle a la comunidad aledaña una mejor calidad de vida, este trabajo es traducido en una infraestructura educativa adecuada y apoyo en los procesos de enseñanza mediante la incorporación de tecnologías de la información y capacitación a los docentes. Esto mismo ocurre en la salud donde las empresas mineras en conjunto con asociaciones de médicos llevan a cabo campañas médicas gratuitas en dichas zonas, no obstante, estas iniciativas deben realizarse en un ambiente propicio de coordinación entre la empresa y el estado con el fin de permitir a los ciudadanos de la zona influenciada ser partícipes de los beneficios (Ganoza, 2012).

La minería realiza sus actividades dentro del concepto de desarrollo sustentable y respeta por convicción la normatividad ambiental siendo otorgadas gracias a sus avances reconocimientos como certificados de industria limpia, auditorías (Gajic, 2010) ambientales, industria socialmente responsable entre otros.

2.5 Biorremediación

La biorremediación es una técnica para limpiar suelos contaminados de una forma muy práctica ya que se usan a los mismos microorganismos que viven en el suelo y el subsuelo. Hay que recordar que al principio se dijo que el suelo y el subsuelo están constituidos por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y microorganismos (Iturbide, 2010). Esta se basa principalmente en una serie de reacciones de óxido-reducción (cuyo fin es la obtención de energía) que se producen en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células y se inicia principalmente en el sustrato (Suarez, 2013), debido a la baja cantidad de

elementos en el sustrato del sitio de estudio, la adición de fertilizantes y sustrato rico en estos será benéfico para la obtención de energía que ayude a las plantas a desarrollarse de una manera óptima.

2.5.1 Ventajas y desventajas de la biorremediación

Es una tecnología poco invasiva y generalmente no requiere componentes estructurales o mecánicos que signifiquen una amenaza para el medio. Comparativamente, es económica viable y al tratarse de un proceso natural, suele tener aceptación por parte de la opinión pública, mientras que la biodegradación incompleta puede generar intermediarios metabólicos inaceptables, con un poder contaminante similar o incluso superior al producto de partida y algunos compuestos contaminantes son tan resistentes que pueden incluso inhibir la biorremediación (Suarez, 2013), además de ser un conjunto de técnicas más amigables con el ambiente, es decir “Ecofriendly”. Es difícil predecir el tiempo requerido para un proceso adecuado y el seguimiento y control de la velocidad y/o extensión del proceso es dispendioso. (King, 1997)

2.6 Técnicas de biorremediación en zonas mineras

Como un prerrequisito para la remediación de áreas afectadas por la actividad minera, es importante comprender la magnitud y extensión de la contaminación dadas las actividades mineras, existen 3 estrategias consideradas para la remediación de suelos contaminados, estas son: biológicos, fisicoquímicos y térmicos (Rani et al, 2018). La opción biológica, conocida también como atenuación natural, se refiere al uso de microorganismos para reducir o remover el

efecto dañino de los contaminantes en el medio y es una alternativa a las mencionadas anteriormente siendo la fitorremediación una tecnología biológica que utiliza las propiedades de la vegetación para la remoción de metales. Esta tecnología trabaja bajo el principio de los procesos bioregenerativos que ocurren naturalmente en el medio para limpiar suelos contaminados, así esta utiliza métodos para la limpieza del agua, aire y suelo dando como resultado productos que no son tóxicos al ambiente y a los organismos (Rani et al, 2018). Este proceso es definido como el proceso donde los desechos orgánicos son biológicamente degradados bajo condiciones controladas hasta un estado inocuo o a niveles debajo de los límites de concentración establecidos por las autoridades competentes (Mueller et al. 1996). Las técnicas de biorremediación son más económicas que las metodologías tradicionales tales como la incineración, aunado a esto algunos de los contaminantes pueden ser tratados in-situ, reduciendo los riesgos por exposición del personal de limpieza o exposiciones de mayor exposición ocasionados por probables accidentes de transporte, dado que la Biorremediación se basa en la atenuación natural, el público la considera más aceptable que otras tecnologías (Vidali, 2001). Los métodos fisicoquímicos (electrorremediación, lavado, solidificación/estabilización, etc.), toman ventaja de las propiedades físicas y químicas de los contaminantes para destruir, separar o contener la contaminación; mientras que los térmicos (incineración, vitrificación, desorción térmica, etc.), en los cuales se utiliza calor para promover la volatilización, quemar, descomponer o inmovilizar los contaminantes en un suelo. (Martínez et al. 2011)

2.7 Técnicas de biorremediación

2.7.1 Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica asistida por microorganismos y plantas, en este caso utilizamos las bondades ecológicas de las plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. Estas fito-tecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo (Delgadillo A., 2011). Estos procesos dependen de las interacciones entre las plantas y los microorganismos que habitan muy cerca de sus raíces, en una zona denominada rizósfera.

2.7.2 Bioventing

Es una técnica muy común que involucra microorganismos aeróbicos para degradar los contaminantes del suelo. El aire y los nutrientes son proporcionados por medio de pozos en el punto contaminado, los microorganismos degradan los contaminantes bajo condiciones aeróbicas para después poder extraer todo aquel contaminante degradado (Rani et al, 2018).

2.7.3 Bioaumentación

Cuando los contaminantes son muy complejos y los microorganismos nativos del suelo no son capaces de degradarlos, cultivos microbianos específicos adicionales pre-cultivados intrínsecos o exógenas son agregados al sitio contaminado para mejorar la degradación de los compuestos no deseados (Tyagi et al. 2011).

Una combinación de microorganismos. a menudo referidos como "cóctel" de microorganismos se agrega al sitio, lo que aumenta la biorremediación intrínseca.

Y en algunos casos pueden usarse microorganismos genéticamente modificados. (GEMs). El uso directo de GEM puede presentar varios riesgos y riesgos para la salud (Rani et al, 2018).

2.7.4 Bioesparción

Esta es una técnica de biorremediación in-situ que utiliza microorganismos para degradar los contaminantes de una zona saturada inyectando aire bajo presión por debajo del nivel freático, esto con el fin de aumentar las concentraciones de oxígeno en el agua subterránea y mejorar la tasa de degradación biológica de los contaminantes por la presencia natural bacterias. La efectividad de la bioarregulación depende de dos factores principales: la permeabilidad del suelo, que determina la biodisponibilidad de contaminantes para los microorganismos, y la biodegradabilidad de los contaminantes (Philp y Atlas 2005).

2.7.5 Bioestimulación

Este sistema utiliza el agua subterránea, esta es conducida a la superficie por medio de un sistema de pozos de extracción, se acondiciona en un reactor para

volverla a inyectar y estimular la degradación bacteriana de los contaminantes del subsuelo. En el reactor en superficie se agregan al agua: nutrientes, oxígeno, microorganismos previamente seleccionados y adaptados, y el efluente se retorna al subsuelo por medio de pozos de inyección, aspersores superficiales o galerías de infiltración distribuidas a lo largo y ancho del sitio que se requiere remediar (Suarez, 2013).

Esta técnica es muy útil en el tratamiento de extensas zonas contaminadas de centros industriales donde no es posible o conveniente parar el proceso operativo para realizar el tratamiento requerido. (CUNNINGHAM, 2000).

CAPITULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

La Colorada se localiza en la región sureste del estado de Sonora, a una distancia aproximada a 50 kilómetros de la ciudad de Hermosillo. Cuenta con una extensión

territorial de 4,701.34 km². Según el II Censo de Población y Vivienda de 2005, el municipio tiene 1,754 habitantes, de los cuales 969 son hombres y 785 son mujeres. Fue fundado entre 1740 y 1743, por misioneros jesuitas (INEGI, 2005).

La zona de estudio está situada dentro de la región del Desierto Sonorense (Fig. 1). Esta región presenta una alta diversidad biológica (Felger, 2000). La parte norte del desierto sonorense va desde un enorme sistema de dunas interiores móviles en California y el gran desierto mexicano, hasta un desierto arborescente y bosques de encino xerófilos en las faldas de las sierras orientales. Al sur, la trayectoria ascendente de oeste a este va, desde los matorrales espinosos de Sinaloa hasta las selvas bajas caducifolias de los pies del monte de la sierra madre, ambos desiertos (Sonora y California) poseen una diversidad florística total de casi 3300 especies con un grado de endemismo para la región combinada (Ezcurra, 1994).

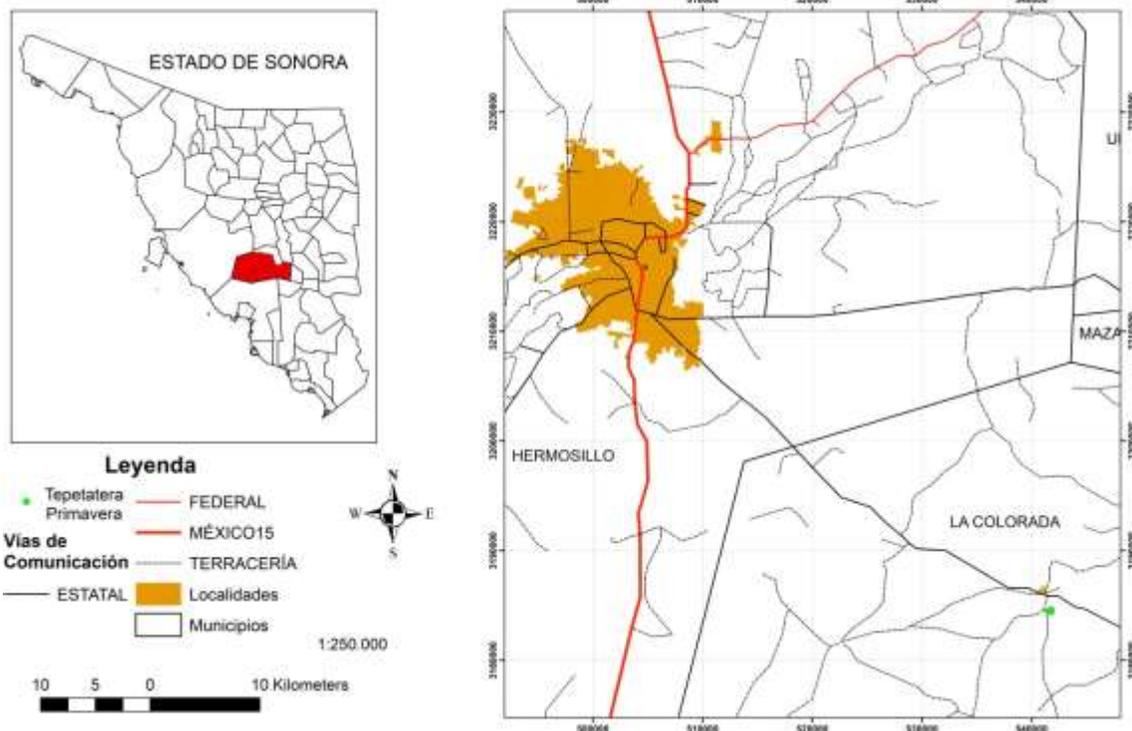


Fig. 1 Localización del sitio de estudio.

En el lugar, se tiene un clima seco, semicálido, con lluvias en verano, con pequeñas variantes en cuanto al factor de temperatura. Existe un déficit de agua durante todo el año, es decir que la evaporación potencial es mucho mayor que la precipitación, dando como resultado que el agua que se puede almacenar, se evapora antes de la temporada de lluvias. Según el sistema de clasificación de Köppen (año) se tiene un clima BSh que corresponde a semiárido. De acuerdo a los registros de la estación meteorológica (La Colorada) que se opera en la mina desde finales de 1995, los vientos dominantes de la zona se presentan en dirección NE y NW, con velocidades promedio de 2.5 m/s.

3.1.1 Vegetación

De acuerdo con INEGI (1981), existen 3 tipos de vegetación para la zona de la mina: mezquital, matorral subtropical con vegetación secundaria arbustiva y matorral subtropical subinérme.

Matorral subtropical: El matorral subtropical se caracteriza por presentar de dos a tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo; el estrato más importante es el arbustivo, que presenta alturas características entre 2 y 4 m. Las especies dominantes pertenecen a los géneros *Acacia*, *Opuntia*, *Fouquieria*, *Prosopis* y *Mimosa*. Sus copas cubren el 60% de la superficie (CONABIO, 2008).

Mezquital: Esta vegetación se caracteriza por la dominancia de especies espinosas en regiones de climas áridos. Estos árboles están especializados en obtener agua subterránea mediante sus largas raíces (Amador y Domínguez, 2015).

Las especies de flora existentes en el área que se encuentran con estatus de protección, según la NOM-ECOL-059-2001 son: *Olneya tesota* y *Guaiaacum coulteri*.

3.1.2 Especies emblemáticas

El bosquejo de Shreve sigue siendo la mejor descripción ecológica de los Desiertos de Sonora y Baja California. El Valle del Bajo Colorado fue descrito como un desierto micrófilo, es decir, una región con plantas de hojas pequeñas como la gobernadora (*Larrea tridentata*) y la jécota (*Ambrosia dumosa*). De hecho,

estas plantas son las verdaderas xerófitas del desierto, pues soportan las sequías más severas sin marchitarse (Ezcurra, 1994).

Aparte de las plantas micrófilas predominantes, la vegetación también incluye algunos árboles achaparrados como el palo fierro (*Olneya tesota*), el palo-verde (*Parkinsonia florida* y *P. microphylla*) y los mezquites (*Prosopis pubescens* y *Prosopis glandulosa var. torreyana*).

Las plantas con tallos suculentos predominan en las Tierras Altas de Arizona, de modo que éste es un desierto crasicaule (del griego crassos, suculento; y caulon, tallo). Situadas al este del Valle del Bajo Colorado y a mayor altitud, las tierras altas reciben más precipitación pluvial (unos 300 mm en promedio) y en ellas predominan los nopales y las chollas (subgéneros *Platy opuntia* y *Cylindro opuntia*, respectivamente, ambos pertenecientes al género *Opuntia*), cactáceas columnares como el saguaro (*Carnegia gigantea*), biznagas (*Ferocactus spp.*) y palo-verdes (principalmente *Parkinsonia microphylla*, Ezcurra, 1994).

3.1.3 Fauna

Las especies de fauna silvestre en el área de estudio están representadas por aves, pequeños mamíferos y reptiles, según lo establecido en la NOM-ECOL-059-2001 (Tabla 1.) estas especies se encuentran con estatus de protección:

Tortuga de desierto (<i>Gopherus agassizii</i>)	Amenazada
Víbora de cascabel (<i>Crotallus atrox</i>)	Sujeta a protección especial
Lagartija (<i>Callisaurus draconoides</i>)	Amenazada
Gavilán cola roja (<i>Buteo jamaicensis</i>)	Sujeta a protección especial

Tabla 1.- Especies con estatus de protección en el sitio.

3.1.4 Hidrología

La Colorada se encuentra ubicada dentro de la región hidrológica No. 9 – Sonora sur (INEGI, 1993), que está conformada por las cuencas de los ríos Mayo, Yaqui, Mátape, Sonora y Bacoachi, sumando una superficie de 137,504km² (Fig.2). La mina se localiza en el parteaguas de las cuencas de los ríos Sonora y Mátape, que se encuentren situadas en la parte poniente de la Región Hidrológica No.9.

Aguas superficiales: La cabecera de la subcuenca que cubre el área al Norte de La Colorada, está constituida por los arroyos de Los Viejitos, El Subiate, Alonso, La Colorada y Paredones que drenan un área del orden de 300km² y corren en una dirección general NE-SW, uniéndose, al arroyo La Poza que drena al poniente hacia la costa de Hermosillo en la cuenca del río sonora. Del poblado hacia el sur de los arroyos de Las Prietas, El Repesito, Las víboras y El Pozo, drenan un área aproximada de 700km² para unirse al arroyo de El salpullido, el cual corre al sur hacia el valle de Guaymas en la cuenca del río Mátape.

Cuerpos de agua: Existen en el área dos repesos, La colorada y Las Prietas a 0.8 y 1.5km al Noroeste y al sureste, respectivamente, del poblado de La Colorada.

Cuyo uso es principalmente para abrevadero. La capacidad máxima en ambos casos es del orden de 100,000m³ la cual se observa disminuida por asolvamiento debido a que los arroyos que los alimentan provienen de los cerros cercanos, presentando pendientes de consideración. El almacenamiento se ve disminuido y llega a ser nulo en el estiaje.



Figura 2.- Carta hidrológica

3.1.5 Geología

Según la descripción geológica de Terra Questum (MIA Expansion, 1995) las rocas aflorantes en el área de la colorada, varían en edad desde el triásico hasta el cuaternario. A grandes rasgos, se trata de metasedimentos compuestos por calizas nodulares, calizas bandeadas de estratificación delgada, areniscas oscuras de cuarzo y cuarcitas blancas, que probablemente pertenecen al grupo barranca del triásico, intrusionadas por un batolito cristalino cretácico de composición granítica, equigranular, formado por cuarzo y feldespatos, color rosado, y que a su vez fue intrusionado por una diorita a cuarzodiorita de hornblenda, verde oscuro constituida de plagioclasa sódica y hornblenda, del final del cretácico y principios del terciario (Fig.3).

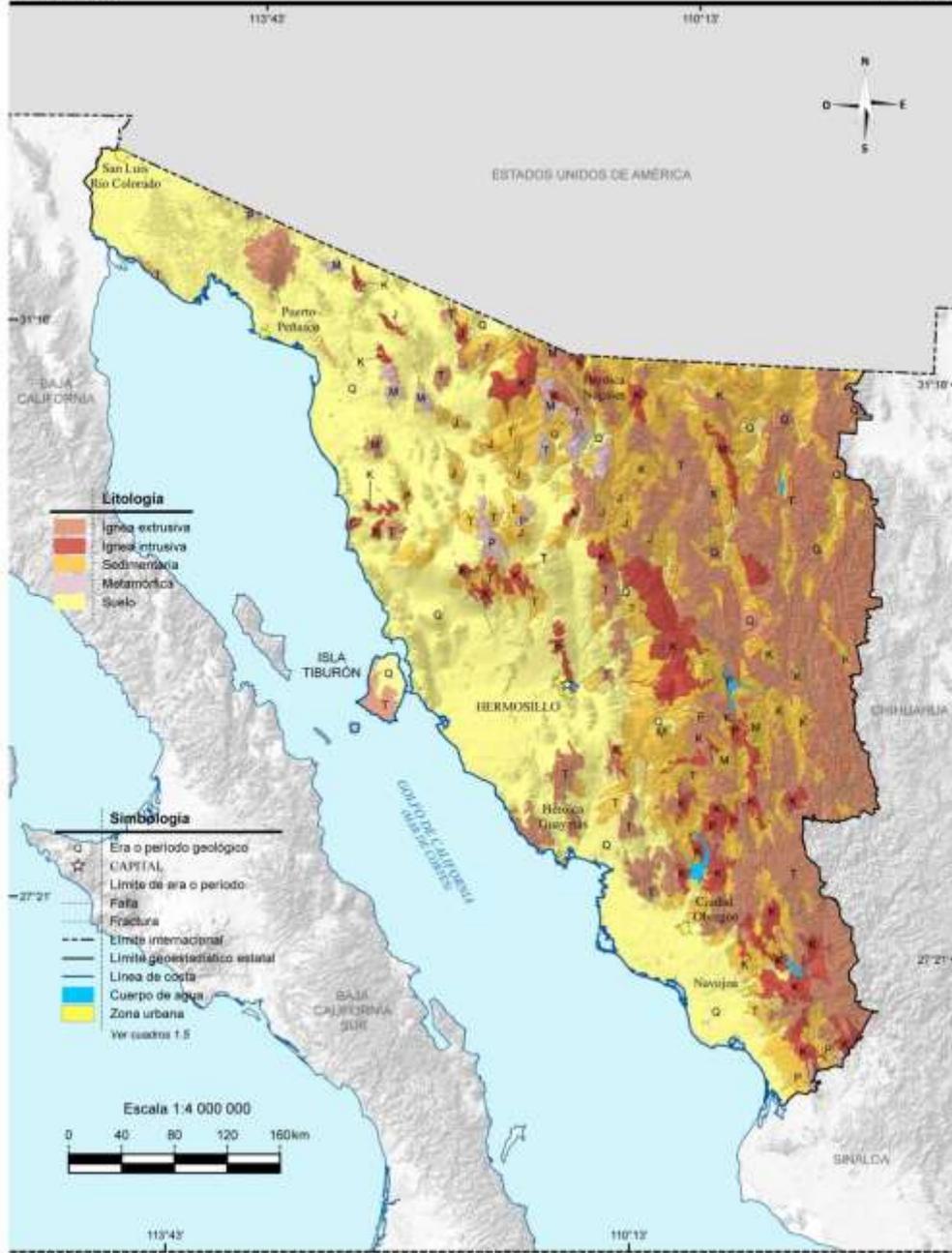


Figura 3.- Carta geológica de Sonora

3.1.6 Edafología

De acuerdo al estudio realizado por Terra Questum (MIA expansión, 1995) los tipos de suelo que se presentan en el área son:

3.1.6.1 Litosol

Esta unidad es de las más ampliamente distribuidas, ya que se le encuentra básicamente en todos los cerros en la parte central del área de estudio. El color que presenta el litosol varía de acuerdo con la roca que lo produce, siendo pardo y ocre en los meta sedimentos, ocre en la diorita, pardo claro en el granito y pardo verdosos en las andesitas. La pedregosidad generalmente es alta con fragmentos grandes y angulosos, sobre todo en las laderas de los cerros. La profundidad promedio es de 0.06m. El perfil característico de este suelo presenta una capa superficial de 0.02 a 0.06 cm de material areno arcilloso con raíces de hierba y pasto, muy suelto y deleznable. Continúa una capa de material más compacto pero suave y deleznable, cuyo espesor varía de 20 a 40 cm, aumentando el volumen y tamaño de los fragmentos.

3.1.6.2 Xerosol

Este tipo de suelo se presenta en las partes planas con pendientes menores de 5°. El color predominante es el pardo ocre. La pedregosidad es muy variable, desde muy baja hasta alta con fragmentos que alcanzan los 20cm. La profundidad promedio es de 0.27m. el perfil típico muestra una capa superficial de 5 cm, areno-arcilloso, suave, poroso, esponjoso, con poco desarrollo de raíces. Le sigue una

capa más compacta de 15 a 20 cm de material areno-arcilloso, más oscuro, con poco desarrollo de raíces, en la mayoría de los casos aumenta la cantidad de los fragmentos de la roca. La parte más profunda está formada por una zona donde predominan principalmente los fragmentos de roca mayores de 5cm, con arcilla y arena entre los mismos la cual llega a formar terrones, generalmente sin raíces.

3.1.6.3 Regosol

El regosol se localiza en las partes planas del oriente y en algunas laderas de poca pendiente. El color que presenta varía de pardo a ocre rojizo. La pedregosidad varia de baja en la zona nor-oriental a media alta en la región centro sur. El espesor en promedio es de 0.53 m, pero con variaciones desde 0.10 hasta 1.50 m en el perfil típico del regosol se aprecia una capa superficial de 0.15 m de suelo pardo arcilloso, con pequeños granos de la roca original, en este caso granito muy suelto y agrietado, poroso y con poco desarrollo de raíces. Le continúan 0.45 m de un suelo más consolidado, pardo, poco poroso, con mayor desarrollo de raíces y muy arcilloso. Debajo de esta capa se encuentra un suelo más compacto de 0.20 m de espesor, con más fragmentos de la roca original, con arcilla y arena entre los fragmentos y pocas raíces. Le sigue una zona de 0.70 m de suelo muy duro donde predominan los fragmentos de roca con arcillas, desaparecen las raíces, el color que predomina es el pardo. Bajo esta zona se encuentra el granito alterado.

3.1.6.4 Fluvisol

Se localiza principalmente en los cauces de los grandes arroyos, presentándose donde las pendientes son menores a 5° C. El color característico de estos suelos es el pardo claro y la pedregosidad es baja, principalmente presentan textura arenosa. La vegetación es más abundante en las orillas que en el cauce, abundando los mezquites. El espesor de este suelo varía de 0.30 m hasta más de 0.60 m en los cauces más grandes. El perfil presenta una parte superficial de 0.10 m de arena y grava, muy suelto, con pocas raíces. Bajo este horizonte se encuentran 0.15 m de arena más clara, prácticamente sin raíces suelo muy suelto. Le continúa una capa lecho de gravas y fragmentos redondeados grandes, con arena y arcilla entre ellos.

3.1.6.5 Gleysol

Este es el suelo con menos distribución en la zona de estudio, encontrándose en las zonas de inundación cercanas a los bordos, con pendientes de 0°. El color de este suelo es pardo a pardo oscuro. La pedregosidad es nula y en cuanto al espesor que presenta es mayor a 0.50 m el perfil muestra una capa de 0.35 m de suelo pardo claro, arcilloso arenoso, con grietas de desecación, compacto, forma terrones, con desarrollo de raíces. Abajo le continua una zona de espesor indeterminado, de suelo compacto pardo oscuro, arcilloso, pocas raíces y esponjoso.

3.2 Hipótesis

Si la actividad minera ocasiona la pérdida de cobertura vegetal para llevar a cabo el proceso minero y todas sus actividades, la restauración de estas áreas y recuperación del suelo es posible mediante la reintroducción de especies nativas clave del lugar.

3.3 Metodología

3.3.1 Trabajo de campo

El estudio fue realizado dentro de la mina, particularmente en la tepetatera “Primavera”. Esta área es antropogénica y su característica es que fue formada de todo aquel material no procesado que no cuenta con cantidades aprovechables de mineral. Este lugar fue seleccionado debido a que se encuentra fuera de cualquier operación de la mina, es de reciente actuación y se encuentra desprovista de vegetación (Fig. A1).

Para llevar a cabo el estudio, se colectaron semillas frescas en campo de cuatro especies leguminosas nativas (*P. praecox*, *P. aculeata*, *P. microphyllum*, *P. juliflora*). El material fue colectado en zonas aledañas a la mina (Fig. A2). También se colectaron muestras de sustrato superficial conocido por la mina como “Topsoil”. Este sustrato es suelo fértil de la cubierta superficial del suelo. Todo el material colectado fue almacenado en laboratorio hasta su uso en el diseño experimental.

3.3.2 Diseño experimental

Se seleccionó la parte central dentro de la tepetatera “Primavera” como lugar de trabajo. Con la ayuda de un equipo de cuatro personas y utilizando palas de trabajo se establecieron 8 unidades experimentales de manera superficial en las cuales fueron colocadas las semillas (Fig. B1). Cuatro unidades experimentales fueron para colocar semillas escarificadas y las otras unidades experimentales para colocar semillas sin escarificación (Fig. B2). Dentro de las cuatro unidades experimentales para las semillas escarificadas, se colocaron cuatro tratamientos: control (sustrato tepetatera), sustrato tepetatera-sustrato topsoil, sustrato tepetatera-fertilizante comercial y sustrato tepetatera-fertilizante comercial y sustrato topsoil. De igual forma, se realizaron los mismos tratamientos para las otras cuatro unidades experimentales donde fueron colocadas las semillas sin escarificación. En cada unidad experimental se colocaron cinco semillas de cada especie seleccionada para dar un total de 20 semillas colocadas por unidad experimental (Fig. C1). Cada unidad experimental fue replicada 15 veces y fueron distribuidas en línea recta con un metro de separación entre cada una. Al término, se obtuvo un total de 2400 semillas sembradas para todo el experimento

El montaje del diseño experimental en campo fue al siguiente día de la primera lluvia de verano. Posteriormente, la germinación fue registrada diariamente durante 15 días. Al término de estos 15 días, el lugar fue visitado una vez cada 15 días durante 2 meses para evaluar la supervivencia de plántulas. Al término de estos dos meses, las visitas fueron solo una vez al mes durante un año para continuar con el registro de supervivencia (Fig. C2).

3.4 Caracterización del sustrato

Para el análisis geoquímico del sustrato, primeramente, se colectó una muestra compuesta que constó de 15 puntos distribuidos al azar del sustrato superficial natural. De igual forma, se colectó una muestra compuesta del sustrato de la tepetatera. En ambos casos, cada muestra obtenida fue de dos kg, la cual fue almacenada en laboratorio hasta su análisis.

En laboratorio, las muestras fueron tamizadas con un tamiz de 2 mm de abertura previamente a su análisis en equipo. Asimismo, las muestras fueron colocadas en un equipo Rotap (tamices del número 18, 35, 60, 125, 230 y <230 respectivamente) con la finalidad de separar las fracciones necesarias para su análisis. Cada fracción obtenida fue colocada en bolsas herméticas para su manejo correspondiente. Las muestras obtenidas fueron analizadas por fluorescencia de rayos X mediante el equipo analizador Niton FXL (Thermoscientific), el cual proporciona los más bajos niveles de detección en 40 elementos. La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente

relacionada con la concentración del elemento en la muestra (Universidad de Alicante, 2019).

3.5 Análisis estadístico

La germinación de semillas fue analizada con los datos obtenidos durante los primeros 15 días. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con la ayuda del programa JMP (SAS Institute, 1999). Previo al análisis se utilizó la transformación arcoseno de los datos obtenidos para cumplir con los supuestos del modelo (Zar, 1999).

En cuanto a la supervivencia, se cuantificó el total de plántulas sobrevivientes de cada especie en cada tratamiento durante el año de registro. Los datos de supervivencia de plántulas en los diferentes tratamientos fueron comparados estadísticamente con la prueba no paramétrica Log-Rank Test de Peto & Peto (en Pyke & Thompson, 1986).

Por su parte, el análisis geoquímico del suelo fue por medio del módulo Montana Soil 2710 utilizando un equipo de Fluorescencia de Rayos X Niton FXL FM-XRF Analyzer, en el Laboratorio de Geología de la Universidad de Sonora.

3.6 RESULTADOS

3.6.1 Germinación de plántulas

Los resultados obtenidos indican que la emergencia de plántulas ocurrió al segundo día de colocadas las semillas en casi todos los tratamientos observados para las cuatro especies. Del total de semillas colocadas (N=2400), se registró poco más del 40% de germinación para las cuatro especies. Sin embargo, la mayor emergencia de plántulas fue registrada en los tratamientos con escarificación donde en algunos casos superó el 60% de emergencia (Fig. 4b, 4d, 5b y 5d). No obstante, en aquellos tratamientos donde no se aplicó la escarificación, el porcentaje de emergencia de plántulas no superó al 30% durante todo el período de observación (Fig. 4a, 4c, 5a y 5c). Asimismo, la especie *Parkinsonia microphyllum* fue la especie que alcanzó mayor porcentaje de emergencia en la mayoría de los tratamientos a diferencia del resto de las especies, tanto para aquellas escarificadas como aquellas sin escarificar (Fig. 4 y 5). En el caso de los tratamientos aplicados (control, top soil y fertilizante), se observaron ligeras diferencias entre ellos durante todo el período de evaluación de germinación tanto para aquellos tratamientos donde las semillas fueron escarificadas como aquellas sin escarificar (Fig. 4 y 5).

El análisis estadístico mostró que existen diferencias significativas entre las especies y entre los tratamientos de escarificación (Tabla 3). Para los tratamientos aplicados (control, top soil y fertilizante) de igual forma, se detectaron diferencias significativas (Tabla 2).

Tabla 2.- Se observa el análisis estadístico para el experimento de germinación.

	F	gl	P
Especies Leguminosas	3.84	3	<0.02
Tratamientos (escarificado y sin escarificar)	10.63	1	<0.02
Tratamientos aplicados (control, top soil y fertilizante)	1.17	2	<0.03

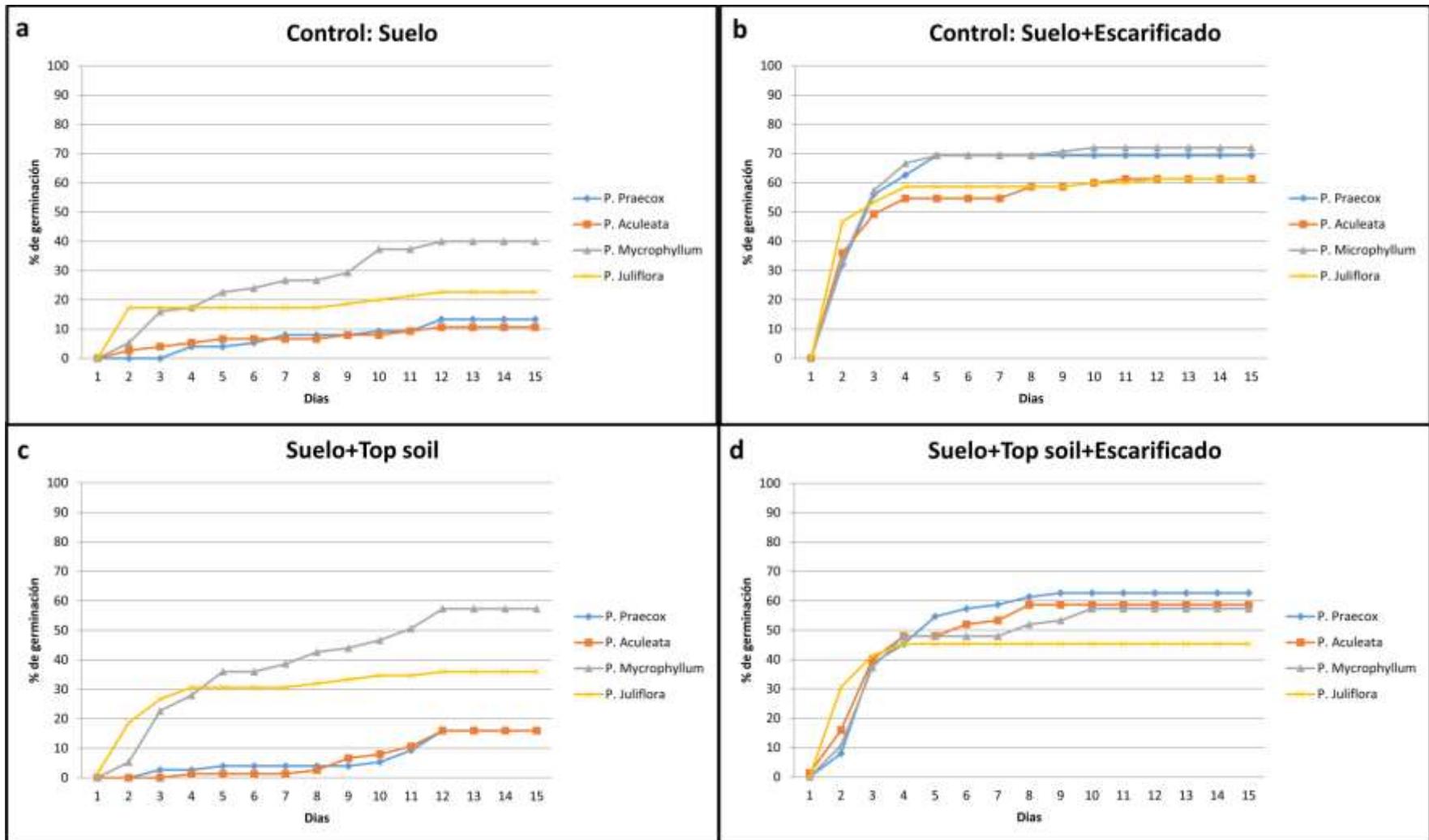


Fig. 4. Porcentaje de semillas germinadas bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) control (a y b), 2) y top soil (c y d).

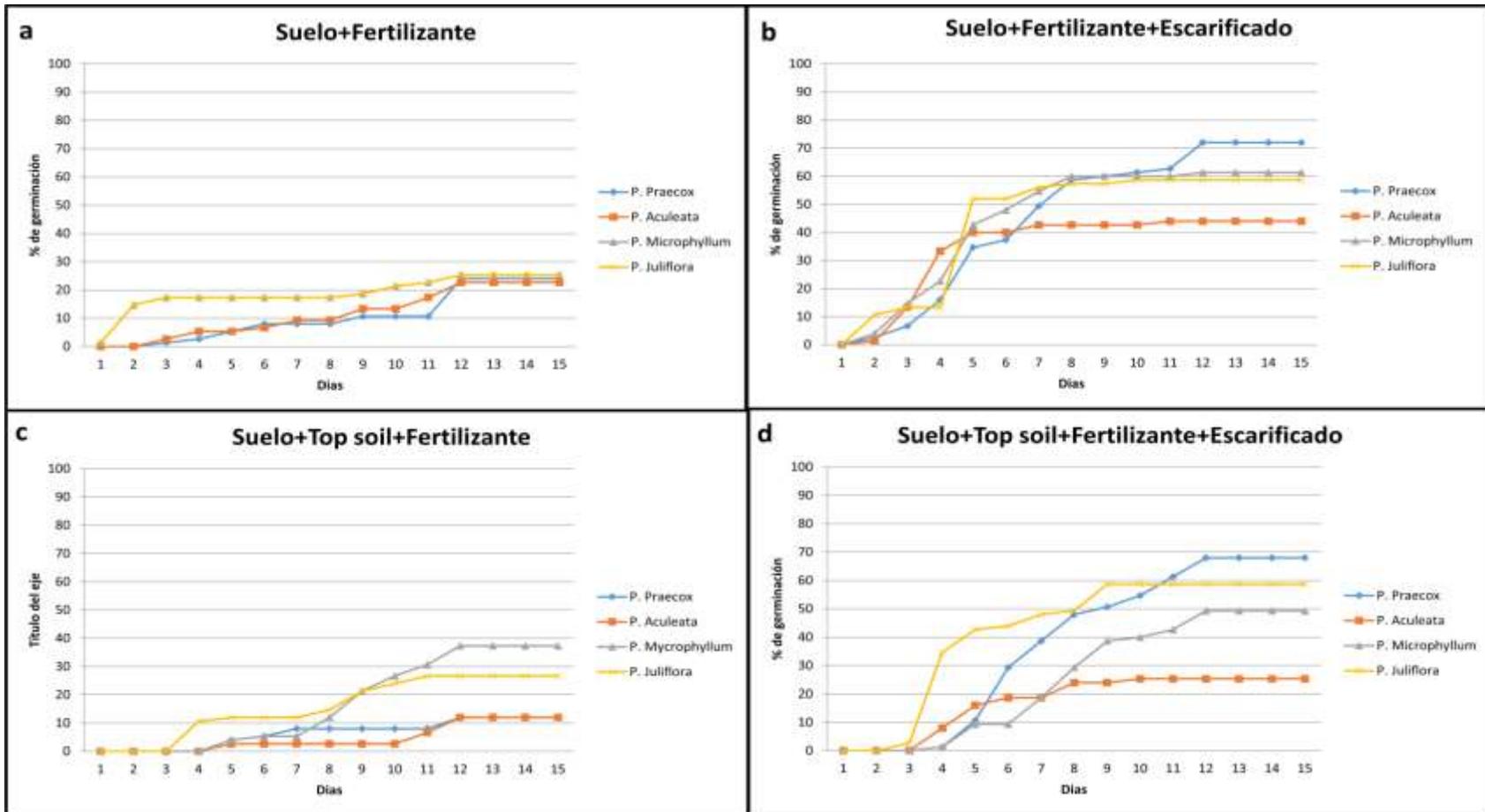


Fig. 5. Porcentaje de semillas germinadas bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) fertilizante (a y b), 2) y top soil-fertilizante (c y d).

3.6.2 Supervivencia

Posterior a un año de observaciones, la supervivencia de plántulas fue mayor al 10% para todos los tratamientos. Los resultados obtenidos indican que aquellas plántulas provenientes del tratamiento con escarificación alcanzaron porcentajes de supervivencia por arriba del 40% en su mayoría (Fig. 6b, 6d, 7b y 7d). Mientras que aquellas plántulas provenientes de las semillas sin el tratamiento de escarificación, la supervivencia no superó el 20% (Fig. 6a, 6c, 7a y 7c). No obstante, aquellos individuos procedentes del tratamiento con escarificación mostraron mejores tallas, un verde más intenso y un mejor vigor a diferencia de aquellas plántulas provenientes del tratamiento sin escarificar. Particularmente, la especie *P. Praecox*, a diferencia del resto de las especies muestra una mayor diferencia entre los porcentajes de supervivencia obtenidos en cuanto al tratamiento escarificado y sin escarificar (Fig. 6). Por su parte, la supervivencia de plántulas detectada en todas las especies para todos los tratamientos aplicados (control, top soil y fertilizante) mostraron porcentajes entre el 20% y el 40% en su mayoría. Sin embargo, la especie *P. Microphyllum* fue la única donde la supervivencia alcanzó porcentajes superiores al 40% en casi todos los tratamientos. Asimismo, las plántulas que corresponden a los tratamientos con el fertilizante mostraron un mejor vigor a diferencia del resto de los tratamientos. Por su parte, la especie que mostró la supervivencia más baja en todo el período de medición fue *Aculeata* con porcentajes que estuvieron hasta por debajo del 10% en algunos tratamientos (Fig. 6).

El análisis estadístico (Tabla 3) mostró que existen diferencias significativas entre los tratamientos escarificados y sin escarificar para todas las especies de estudio.

Tabla 3.- Análisis estadístico de la supervivencia para las cuatro especies de estudio.

	LR	gl	P
<i>Parkinsonia praecox</i>			
Control	92.673	1	<0.0001
Topsoil	83.358	1	<0.0001
Fertilizante	74.024	1	<0.0001
Topsoil-Fertilizante	101.699	1	<0.0001
<i>Parkinsonia aculeata</i>			
Control	125.251	1	<0.0001
Topsoil	28.279	1	<0.0001
Fertilizante	25.573	1	<0.0001
Topsoil-Fertilizante	12.791	1	<0.0001
<i>Parkinsonia microphyllum</i>			
Control	68.115	1	<0.0001
Topsoil	57.546	1	<0.0001
Fertilizante	49.77	1	<0.0001
Topsoil-Fertilizante	47.649	1	<0.0001
<i>Prosopis juliflora</i>			
Control	98.713	1	<0.0001
Topsoil	35.359	1	<0.0001
Fertilizante	76.467	1	<0.0001
Topsoil-Fertilizante	27.711	1	<0.0001

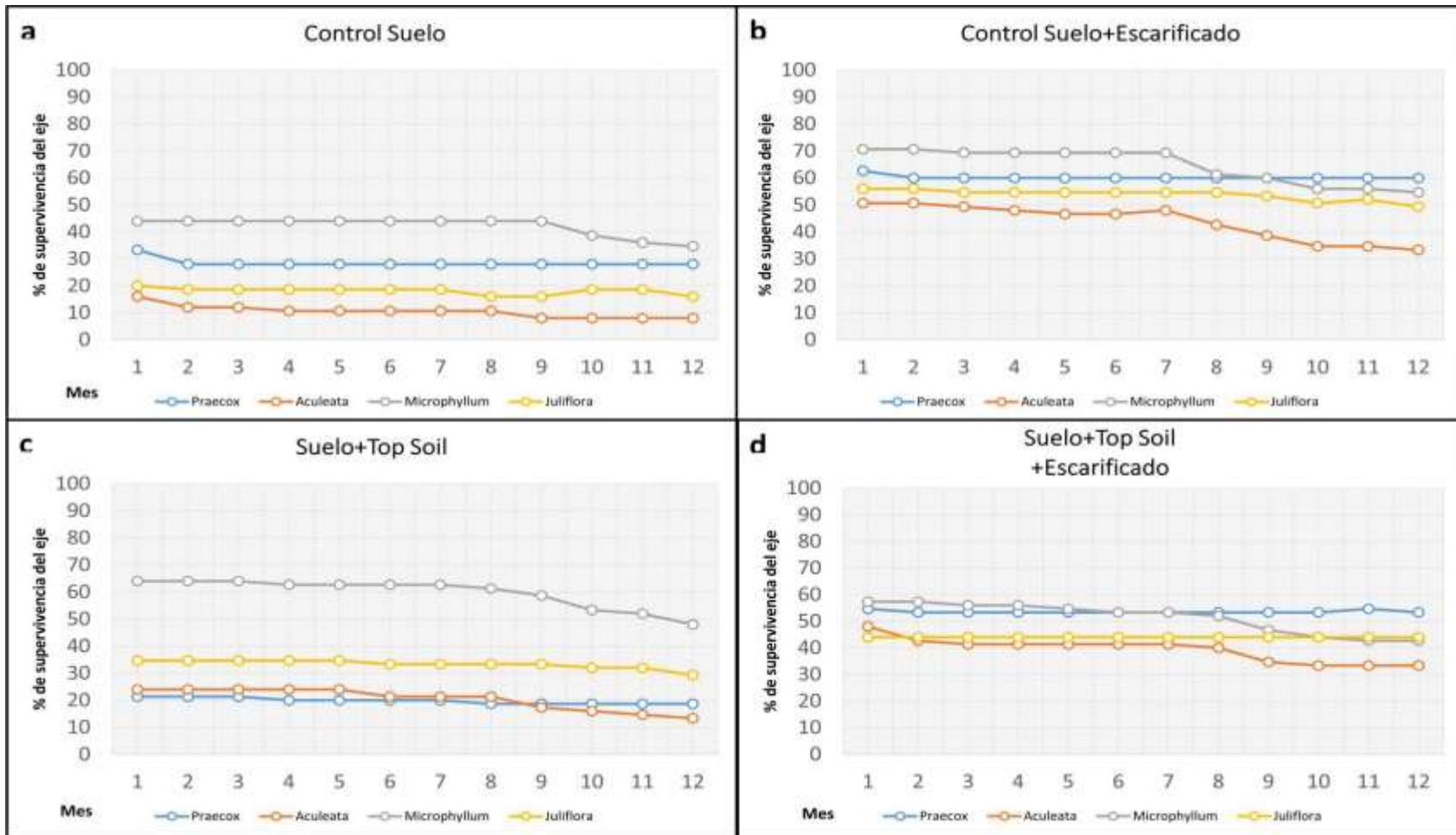


Fig. 6. Porcentaje de supervivencia bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) control (a y b), 2) y top soil (c y d).

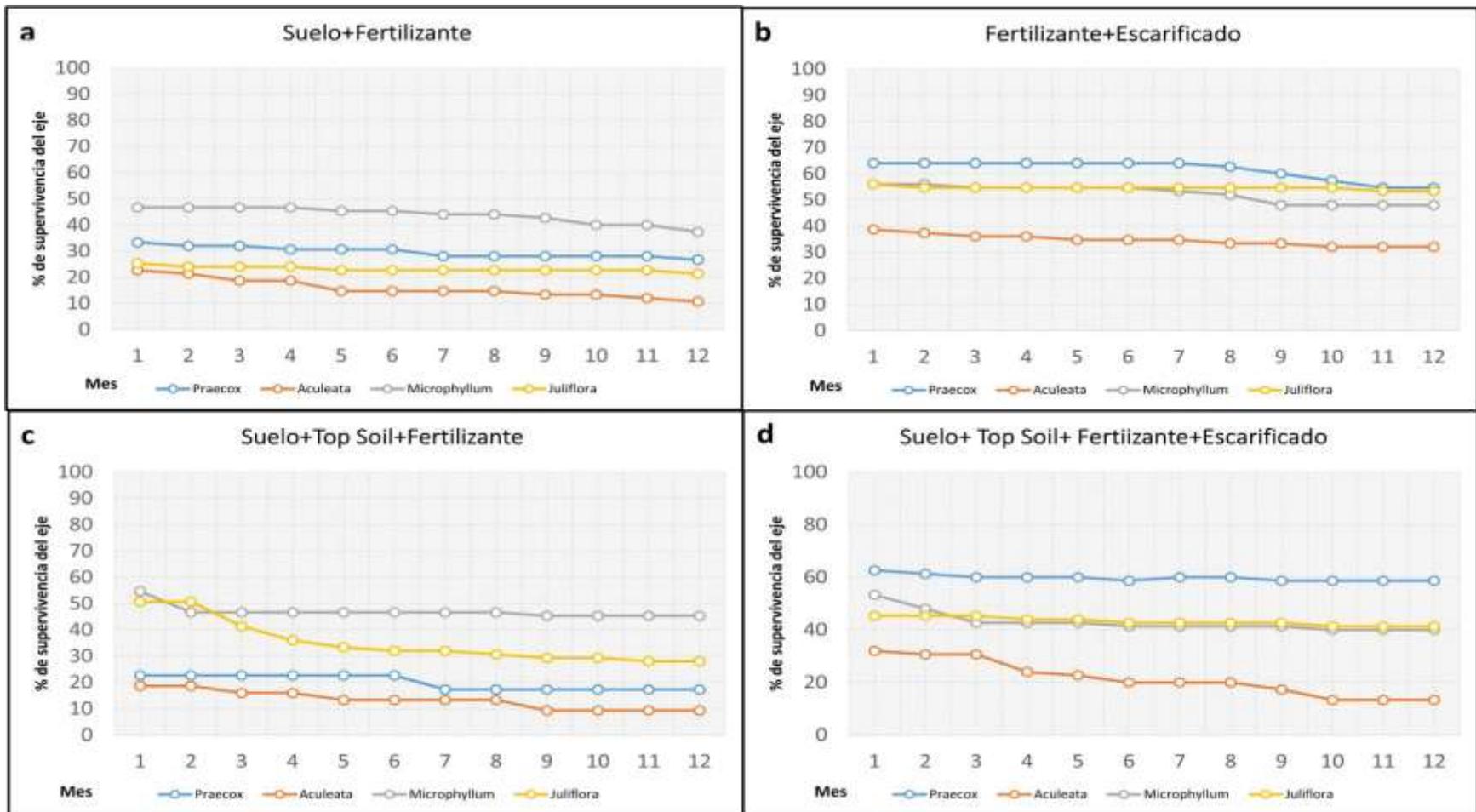


Fig. 7. Porcentaje de supervivencia bajo tratamientos de escarificación (b y d) y sin escarificar (a y c). Se observan los tratamientos: 1) fertilizante (a y b), 2) y top soil-fertilizante (c y d).

3.6 Geoquímica del suelo

En cuanto a la geoquímica del suelo, es clara la diferencia entre el sustrato de la tepetatera en comparación con el top soil ya que el primero proviene de la roca triturada la cual no es aprovechada por la actividad minera. En el caso del top soil, esta proviene directamente del material natural recuperado de la base superficial del suelo. En general, el pH obtenido para ambos sustratos fue ácido, aunque el sustrato del tepetate mostró valores más bajos (4.75) a diferencia del top soil (6.53). Por su parte, los resultados obtenidos para la composición geoquímica del suelo indican una mayor cantidad de elementos en el sustrato top soil a diferencia del sustrato de la tepetatera (Fig. 8). Sin embargo, dada la naturaleza del sustrato del tepetate es de esperarse solo la presencia de minerales provenientes de la roca madre. Asimismo, existe una clara evidencia en cuanto a la presencia de Ca principalmente el cual se encuentra en concentraciones altas en el top soil en contraste con el sustrato de tepetate el cual se encuentra en concentraciones muy bajas (Fig. 9).

En cuanto a los elementos mayores (Fe, Mn, Ti, Ca y K) podemos notar una gran diferencia entre los sustratos analizados (Fig. 10, Tabla 1 y 2 anexos). Existen diferencias considerables en cuanto a su concentración, siendo para casi todos mayores en el top soil a diferencia del sustrato de la tepetatera el cual indica concentraciones menores (Fig. 11). No obstante, en el caso del Fe, este fue más

abundante en la tepetatera a diferencia de las concentraciones detectadas para el top soil.

Fig. 8. Gráficas de Concentración elemental en muestra total (M.T.) para los sitios de tepetate.

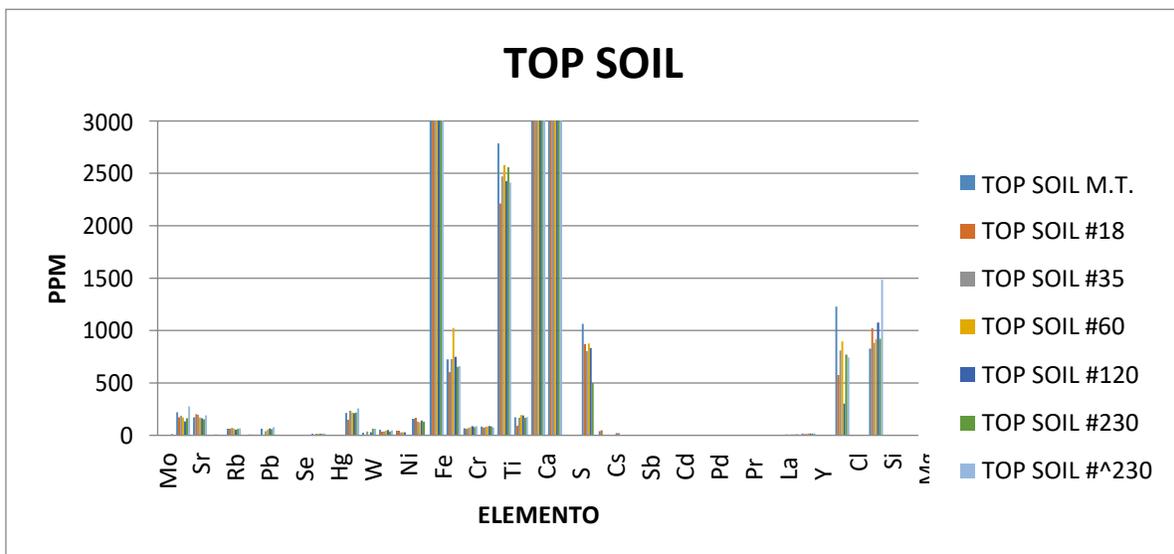
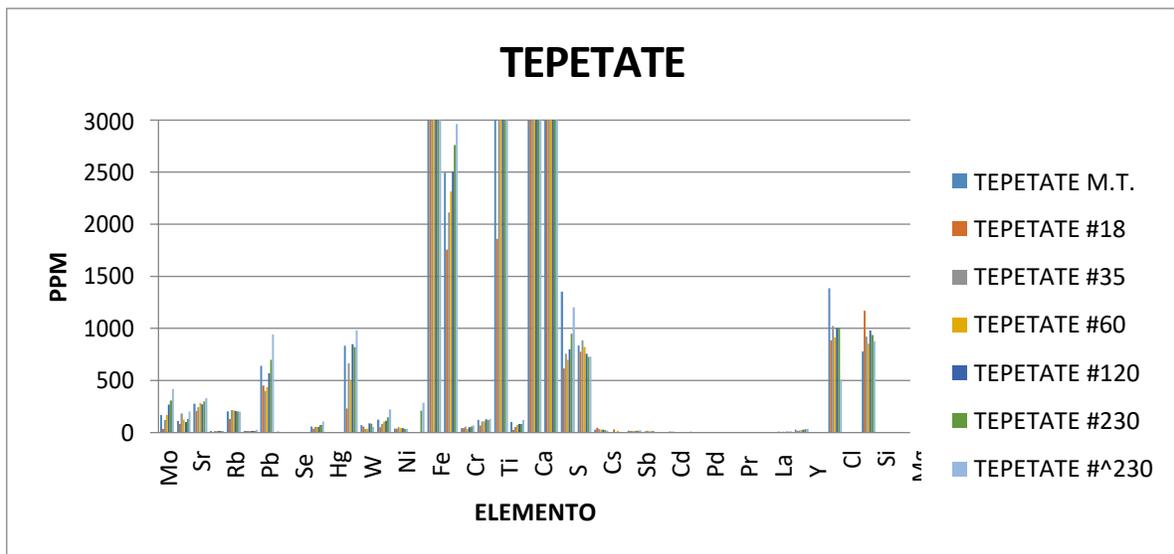


Fig. 9. Gráficas de Concentración elemental en muestra total (M.T.) para los sitios de top soil.

Fig. 10. Gráficas de Concentración elemental en muestra total (M.T.) de los elementos mayores para los sitios de tepetate.

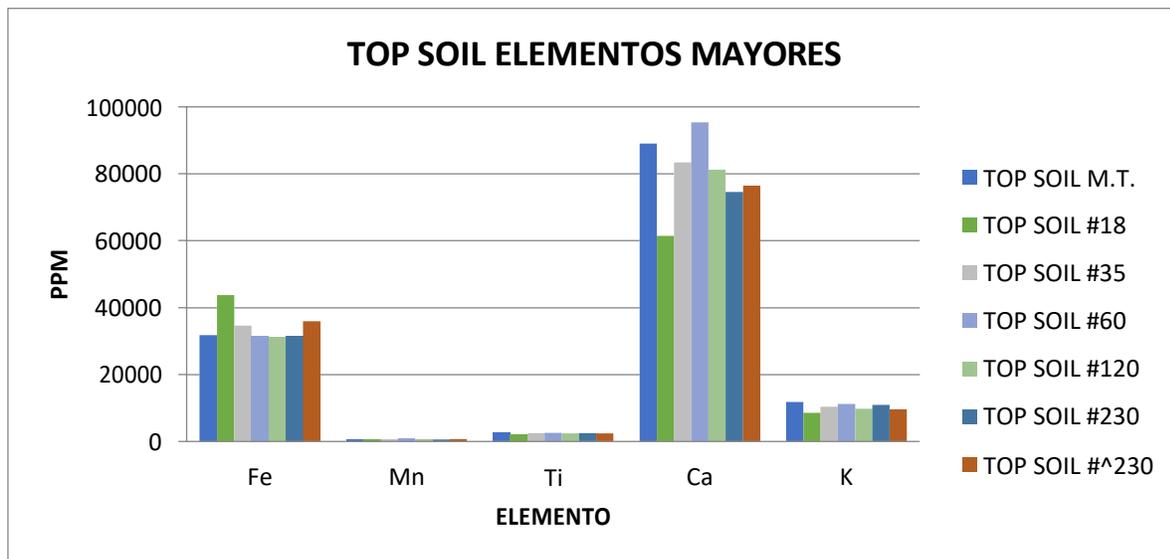
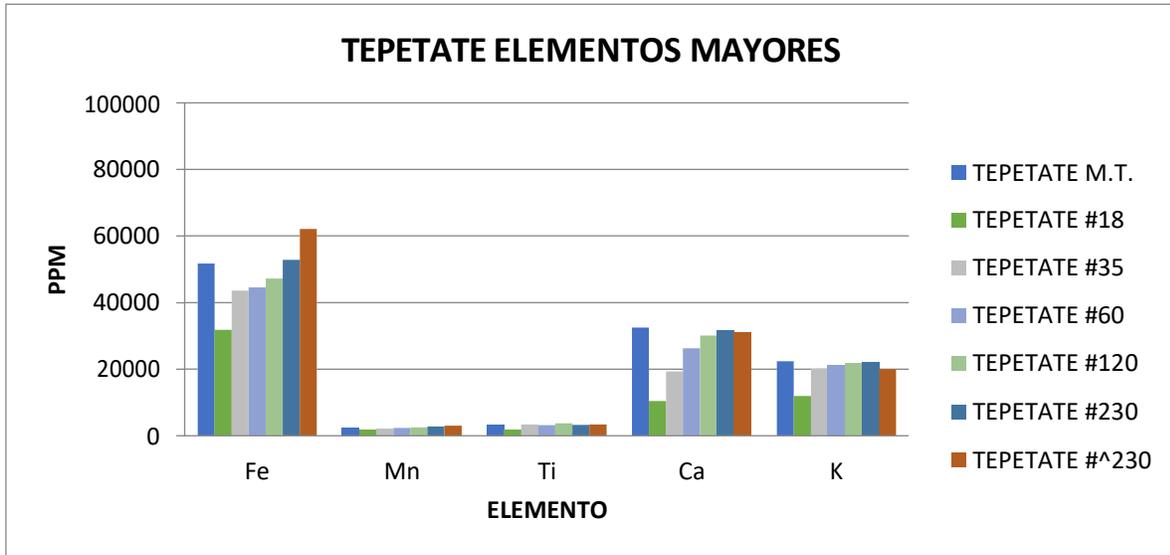


Fig. 11. Gráficas de Concentración elemental en muestra total (M.T.) de los elementos mayores para los sitios de top soil.

3.7 Discusión

La actividad minera es reconocida en una escala mundial como un generador de materia prima y crecimiento económico. No obstante, esta actividad conlleva a un impacto ambiental considerable tanto de flora como de fauna. Dado lo anterior, resulta de vital importancia evaluar el impacto ambiental para ambos casos con la finalidad de generar propuestas para llevar a cabo acciones de recuperación tanto de flora como de fauna con la finalidad de que en el área impactada se inicie un proceso de sucesión y que poco a poco se obtenga la incorporación de este espacio al ecosistema natural. En Sonora, a pesar de la normatividad existente que indica acciones de recuperaciones ecológicas en la etapa de cierre de mina, las medidas desarrolladas para llevar a cabo dichos procesos no resultan con el éxito esperado. En este estudio evaluamos algunas posibilidades de recuperación vegetal con experimentos sencillos insitu en las primeras etapas de vida de algunas plantas leguminosas del desierto Sonorense.

3.7.1 Germinación

Es conocido que las semillas de las plantas de desierto tienen una mayor probabilidad de germinación cuando disponen de agua o se encuentran debajo de una planta nodriza (Valiente-Banuet, 1991, Valiente-Banuet y Ezcurra, 1991). Diferentes autores coinciden en que los principales factores que afectan la germinación de semillas es el agua, la temperatura y la luz. No obstante, la disponibilidad de agua es reconocida como el factor más importante ya que resulta

ser el factor limitante bajo las condiciones que prevalecen en el desierto (Godínez-Álvarez et al., 2003). En nuestro estudio, a pesar de la carencia de vegetación nodriza en el lugar, el tratamiento para romper la latencia de las semillas conocido como el tratamiento de escarificación fue el que presentó mayor éxito al resultar en una mayor emergencia de plántulas para todas las especies, en contraste con aquellas semillas que no tuvieron ningún tratamiento. Asimismo, se detectó una germinación temprana en aquellas semillas escarificadas a diferencia de aquellas sin escarificar las cuales su germinación ocurrió en días posteriores. Con el comienzo de las lluvias de verano, probablemente las condiciones para el proceso de germinación en las semillas escarificadas se mostraron favorecido para este tratamiento. Es probable que la baja germinación en aquellas semillas sin ningún tratamiento haya sido consecuencia del proceso natural conocido como “hydration-dehydration seed set”, el cual indica que, bajo condiciones extremas, con el proceso de hidratación-deshidratación, la semilla poco a poco rompe su latencia para llevar a cabo la emergencia de la plántula (Benadjaoud et al., 2013). En contraste, aquellas semillas con el tratamiento de escarificación, entraron rápidamente en contacto con el agua, garantizando de esta manera la emergencia de la plántula. Estos resultados indican que el rompimiento de la latencia para garantizar la emergencia de la plántula es un factor clave en estos procesos de introducción de vegetación. Se ha documentado que, en los desiertos de las mesetas del Colorado, la escarificación mecánica aplicada a semillas nativas incrementa la velocidad de germinación de las plantas (Landis y Thompson, 1997). De esta manera, esta simple acción mecánica podría considerarse como un factor

clave en acciones de introducción o reintroducción de vegetación en áreas impactadas por actividad minera.

3.7.2 Supervivencia

En los ecosistemas áridos y semiáridos, el establecimiento y la supervivencia de plántulas en sus primeras etapas de crecimiento resultan ser las fases más sensibles del ciclo de vida (Valiente-Banuet et al., 2002). Se ha documentado que las plantas nodriza proveen de un microambiente favorable para el establecimiento. No obstante, a pesar de que, en nuestro estudio, el área experimental carece de vegetación y por consiguiente de plantas nodriza, la supervivencia de plántulas se mostró favorable. Bajo condiciones extremas del desierto Sonorense, se ha documentado que en particular las especies leguminosas resultan ser excelentes para llevar a cabo acciones de reforestación (Bashan et al., 2012). Bajo este supuesto, se ha documentado que particularmente *Prosopis* y *Parkinsonia* resultan ser candidatos excelentes dadas sus diversas bondades ecológicas (rápido crecimiento, establecimiento deseable, fijadoras de nutrientes, etc.). Dado lo anterior, el resultado obtenido coincide con los obtenidos en estudios previos que señalan el rápido establecimiento de especies leguminosas en áreas desprovistas de vegetación (Bashan et al., 2017; Bashan et al., 2012; Bashan et al., 2009). Asimismo, en nuestro trabajo también detectamos que aquellas plantas provenientes de semillas bajo el tratamiento de escarificación manual, mostraron un mayor crecimiento y mayor acumulación de biomasa aérea. De esta manera, puede suponerse que, con una rápida emergencia de la plántula, se garantiza la

supervivencia debido a la mayor acumulación de recursos y la rápida adaptación al lugar. De igual forma, a pesar de que en ningún momento del experimento las plántulas fueron regadas, podemos suponer que la adaptación a las condiciones del lugar resulta suficiente para iniciar el proceso de establecimiento con especies leguminosas. Asimismo, dicha condición resulta sumamente atractiva a las actividades mineras, ya que a diferencia de aquellas acciones que implican un trasplante, con nuestro proceso se garantiza la permanencia de individuos en el lugar. Bajo este contexto, el seguimiento de la supervivencia de las plántulas nos podría proporcionar la capacidad de introducción de plantas nativas a estos ambientes mineros con muy poca inversión económica. Asimismo, en el largo plazo podrían ser planteados programas de recuperación de áreas desprovistas de vegetación mediante la colocación de semillas provenientes de plantas nativas bajo tratamientos de escarificación y evaluar su éxito bajo diversas condiciones.

3.7.3 Tratamientos control, top soil y fertilizante

Con el análisis de los tratamientos aplicados, se observó que el tipo de tratamiento influyó considerablemente en los resultados obtenidos. En algunos casos, para los tratamientos top soil y fertilizante, se detectaron individuos con una mejor biomasa a diferencia de los tratamientos control. En el caso del tratamiento top soil, el sustrato pudo favorecer a la supervivencia de individuos debido a la microbiota presente. Se ha documentado que la presencia de microorganismos favorece el crecimiento de plantas bajo condiciones extremas (Bashan et al., 2012). De igual forma, la disponibilidad de fertilizantes comerciales de liberación prolongada

contribuye favorablemente a la supervivencia. En un estudio documentado en Tucson, Arizona, cinco especies de *Prosopis* fueron escarificadas bajo distintos métodos, resultando que la adición de nutrientes incrementó la supervivencia de individuos (Vilela y Ravetta, 2000). En nuestro caso, las plántulas en los tratamientos adicionados con nutrientes tuvieron un mejor desempeño, una mejor biomasa e incrementaron su probabilidad de supervivencia en el lugar. Con una germinación más rápida, probablemente las plántulas desarrollaron una biomasa radicular superior al resto de los otros individuos logrando de esta manera un mejor desempeño. Dado lo anterior podemos mencionar que a pesar de la notable diferencia entre los elementos del sustrato de ambos tratamientos las plantas fueron capaces de adaptarse (unas mejor que otras) para crecer con los elementos a su disposición y teniendo en cuenta el impacto ambiental del lugar, dicha adaptación indica que las plantas son capaces de sobrevivir en zonas adversas como son las tepetateras de minas. Esto es de suma importancia ya que si las plantas son capaces de crecer y desarrollarse en este tipo de ambientes significa que podrían crear una sucesión ecológica, es decir atraer a nuevas especies y poco a poco recuperar los elementos naturales que existían anteriormente en el sitio. En el caso de este experimento, pudimos observar que esto es posible gracias a la observación de huellas y otros organismos (Fig. E1 y E2). Una de las observaciones más notables fue el establecimiento de plantas que no había en el sitio antes de montarse el experimento (Fig. F1). Por su parte, dado que el objetivo de este proyecto fue conocer si es posible el establecimiento de vegetación en tepetateras, no se consideraron parámetros de fauna. No obstante, dado el crecimiento de plantas ajenas al experimento, podemos suponer que

dichas semillas fueron acarreadas si no por anemofilia, por la visita de aves, lo que confirma que las plantas que están creciendo como resultado de este trabajo, son capaces de atraer organismos comenzando así un nuevo ciclo de sucesión ecológica.

3.7.4 Geoquímica del suelo

Los resultados geoquímicos indican que a pesar de que en el sustrato de tepetatera la concentración de elementos es poca, la supervivencia de plántulas puede llevarse a cabo. Es posible que los requerimientos nutritivos que necesita la planta para iniciar su ciclo de vida en sus primeras etapas sean proporcionados por la disponibilidad de minerales en la tepetatera. Se ha documentado que, en ocasiones, la carencia de recursos disponibles para las plantas es un factor limitante para la supervivencia de estas, no obstante, existen elementos claves que garantizan su supervivencia en ambientes infértiles (Manning, 2010). Lo anterior podría considerarse como un factor clave para llevar a cabo acciones de introducción de plantas a estos ambientes inertes debido a que solamente con disponibilidad de humedad, el establecimiento de plántulas puede ocurrir. En ocasiones, se ha explorado el éxito en utilizar rocas minerales como agentes fertilizantes lo cual ha resultado con éxito para el establecimiento y supervivencia de plantas (Straaten, 2006). Lo anterior, ha resultado en la sustitución del uso de agentes químicos que en casos extremos donde éstos son aplicados, se llega a impactar considerablemente el lugar resultando en espacios degradados y posteriormente abandonados.

3.8 Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que la germinación y supervivencia de plántulas de leguminosas sin la aplicación de algún riego puede ocurrir en las tepetateras de manera natural, mediante un tratamiento previo de escarificación. La aplicación de esta técnica resulta sumamente económica y atractiva, siendo una posible alternativa a las necesidades de las empresas mineras que requieran llevar a cabo acciones de fitorremediación. Con ello, cabe la posibilidad de mitigar el impacto ambiental ocasionado por las operaciones mineras. Nuestros resultados demuestran que la aplicación de riego o cuidados excesivos no resultan relevantes para garantizar la supervivencia de individuos en el lugar. Por su parte, considerando que el sitio de estudio está ubicado en una zona semiárida, la implementación de esta técnica puede tener mejores resultados en zonas con mayor precipitación. Con ello, no solamente se beneficia el cuidado del agua sino que también la reducción de gases a la atmósfera producidos por la maquinaria que acarrea agua, misma contaminación que produciría el acarreo de vegetación para los proyectos de remediación en la etapa de abandono sin mencionar que el uso de organismos desarrollados para este tipo de proyectos no asegura su supervivencia debido al estrés que sufren las plantas al ser reubicadas, factor que se reduce a cero debido a que los organismos que se utilizan en este proyecto se desarrollaron en el sustrato y se adaptaron a las condiciones insitu. Asimismo, puede considerarse que los resultados obtenidos en la geoquímica del suelo, podemos mencionar que las plantas sembradas en la tepetatera son capaces de

adaptarse sin muchas dificultades, y que sus características naturales son de gran ayuda para llevar a cabo acciones de fitorremediación requeridas por la mina. De igual forma, la implementación de este tipo de técnicas es capaces de crear un ciclo de sucesión ecológica, asegurando la remediación del sitio a largo plazo. Por lo que si este tipo de acciones son implementadas al momento de desocupar un sitio afectado se podrían reducir los costos de remediación en cuanto a mano de obra, traslado de organismos etc., en la etapa de abandono, en especial si esta llega después de 5 a 10 años, período de tiempo aceptable para declarar una sucesión ecológica en el largo plazo.

3.9 Recomendaciones

- Como recomendaciones para la aplicación de esta técnica se sugiere llevar a cabo los procesos de escarificación al momento de sembrar las semillas, esto debido a que se corre el riesgo de que el embrión muera debido a la exposición al medio sin estar sembrado.
- Dados los porcentajes de supervivencia obtenidos en este proyecto es importante multiplicar la cantidad de semillas que se utilizó para así garantizar el máximo el número de individuos posibles, hecho que se puede ver fácilmente en la naturaleza ya sea en flora o fauna.
- Es importante comenzar esta práctica días antes de la temporada de lluvias con el fin de asegurarse que las plantas obtengan la humedad suficiente para sobrevivir ya que el principal objetivo es no intervenir en el proceso de desarrollo de las plantas con el fin de que estos organismos sean autosustentables y puedan comenzar una sucesión exitosa, además de utilizar la menor cantidad de recursos que puedan considerarse como gastos para la compañía que aplique este método.
- Debido a que no se había implementado esta metodología anteriormente, es recomendable analizar distintos métodos de escarificación para determinar cuál es el que da mejores resultados.

4 Bibliografía

A. E. Vilela & D. A. Ravetta (2000) The effect of seed scarification and soil-media on germination, growth, storage, and survival of seedlings of five species of *Prosopis* L. (Mimosaceae), IFEVA y Cathedra de Cultivos Industriales, Fac. Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina

Agencia para la protección ambiental de los EEUU (EPA), título 40 del código Federal de Regulaciones, sección 70.2, Recuperado de: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2009-title40-vol15/xml/CFR-2009-title40-vol15-part70.xml>

Ali H, Khan E, Sajad MA (2013) Phytoremediation of heavy metals- concepts and applications.

Angulo L., 2013. La minería en el mundo y en México. Recuperado de: <http://www.jornada.com.mx/2013/04/08/eco-f.html>

Amador Rosas, J. A. y C. Domínguez Romo. 2015. Determinación de la concentración de partículas biológicas (polen y esporas fúngicas) y no biológicas (PST) en la zona Norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Ecología. Universidad Estatal de Sonora. Hermosillo, Sonora.

ARGONAUT GOLD, 2011. Proyecto minero “San Antonio” Baja California Sur, compañía minera Pitalla S.A. de C.V.

Argonaut Gold, 2017. La Colorada, una mina socialmente responsable, Recuperado de:
http://www.argonautgold.com/resources/espanol/La_Colorada.pdf

Bawa, K.S. 1983. Patterns of flowering in tropical plants. En: Handbook of experimental pollination biology (C.E. Jones y J. Little, eds.), pp. 394-410. Van. Nostrand, New York.

Benadjaoud, A., Benhassaine-Kesri, G., Zachowski, A., & Aïd, F. (2013). Effects of dehydration and rehydration on the leaf lipids and lipid metabolism in *Parkinsonia aculeata* (Caesalpinaceae). *Botany*, 91(8), 505-513.

CAMIMEX. (2006). La industria minera de México. México: Camara minera de México.

Carmona-Chit E., Carrillo-González R., González-Chávez Ma., Vibrans H., Yáñez-Espinosa L. & Delgado-Alvarado A. (2016) Riparian plants on mine runoff in Zimapán, Hidalgo, Mexico: Useful for phytoremediation?, *International Journal of Phytoremediation*, 18:9, 861-868, DOI: 10.1080/15226514.2016.1156639

Chemosphere 91:869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

CHISHOLM, A.; DUMSDAY, R. 1987. Land degradation: problems and policies. London: John Wiley, 404 p.

Colaboraciones Técnicas: Trasplante de grandes árboles 21 agosto, 2012
Publicado por REDFORESTA en Revista Foresta Trasplante de grandes árboles.
José A. Saiz de Omeñaca Marta Giraldo Gutiérrez de Loma Antonio Prieto
Rodríguez Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad
Politécnica de Madrid

CONAFOR, 2010. Prácticas de reforestación. Manual básico, Comisión Nacional Forestal, Primera edición.

Contreras Montellano, Oscar (1986), La minería en Sonora: modernización industrial y fuerza de trabajo, El Colegio de Sonora, Cuadernos de Divulgación.

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Recuperación de áreas degradadas por minería mediante la nivelación de cargueros en las veredas puente del Tigüí y la vereda Icacales en la cuenca hidrográfica del río Tigüí

CUNNINGHAM C, Philp J. Comparison of Bioaugmentation and Bioestimulation in ex situ treatment of Diesel Contaminated Soil. Land Contamination and Reclamation. 2000; 8 (4): 261-269.

Delgadillo A., 2011. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación, Tropical and Subtropical Agroecosystems, pp. 597- 612.

Diario oficial de la federación, 1996. Reformas de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al ambiente.

Diario oficial de la federación, NOM-ECOL-059-1994 que determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazado, raro y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección.

Dirección General de Minas, 1994. Subsecretaría de Minas, SEMIP.

Ezcurra-Exequiel, et.al 1994. Los Desiertos de Sonora y Baja California. Recuperado el 9 de septiembre de 2015, recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/368.pdf>

Felger, R.S.; M. Johnson; M. Wilson. 2000. The Trees of Sonora, México. Oxford Univ. Press

Gajic G., , Djurdjevic L., Kostic O., Jaric S., Mitrovic M., Guía Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros, 2010, Alianza Mundial de Derecho Ambiental (ELAW), Eugene OR 97403. Recuperado de: <https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Guia%20%20para%20Evaluar%20EIAs%20de%20Proyectos%20Mineros.pdf>

Ganoza, R. B. (2012). La minería responsable y sus aportes al desarrollo del Perú. Perú: Compañía de mina Buenaventura S.A.A.

Harraz, H. Z. (2010). Mining Methods: Part I-Surface mining. Tanta: Tanta University.

Hernández, R. M. (2015). Mi México es minero. México: Asociación de ingenieros de minas, metalurgistas y geólogos de México, A.C.

Holl K., 2002. Long-term vegetation recovery on reclaimed coal surface mines in the eastern USA. Journal of applied ecology 39:6, 960-970.

INEGI-INE (2000). Indicadores de Desarrollo Sustentable en México. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática e Instituto Nacional de Ecología. México, DF. 213 pp.

INEGI. (2014). Mining in México (Mexico City, Mexico: Instituto Nacional de Estadística y Geografía), pp.145.

INEGI (2005). Principales resultados por localidad 2005 (ITER)

INEGI, (2009), Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, La Colorada, Sonora

JC (eds) Bioremediation: applied microbial solutions for real-world environmental cleanup. American Society for Microbiology (ASM) Press, Washington, DC, pp 139–236

King R.B.; Long, G.M. y Sheldon, J.K. (1997). Practical environmental bioremediation, the field guide. Lewis publishers, NY.

Lamb D. & Don Gilmour 2003. Rehabilitation and Restoration of Degraded Forests. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK and WWF, Gland.

Landis, T.D.; Thompson, J.R., tech. coords. 1997. National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations—1997.

Leadem, C. L. (1997). Dormancy-unlocking seed secrets. National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations. Gen. Tech. Rep. PNW-G TR-419. Portland, OR: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 43-52.

Lekic M., Crnogorac L., Pantelic U., Nikic Z., (2017), Possibility of application of phytoremediation in mining, 6th International Symposium Mining and Environmental Protection, 355-360.

Manning, D. A.C.. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2010, 30 (2), ff10.1051/agro/2009023ff. fhal-00886529f

Martínez Prado A., Pérez López Ma. E., Pinto Espinoza J., Gurrola Nevárez B. A. y Osorio Rodríguez A. L., 2011, Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes, Instituto Tecnológico de Durango y 2Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (IPN-CIIDIR) Unidad Durango.

McHaina, 2001, DM, 'Environmental Planning Considerations for the Decommissioning, Closure and Reclamations of a Mine Site', International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol.5 (3), pp.163-176.

Monreal Saavedra, et al, 2015. Mi México Es Minero, Tercera edición.

Nuñez Jiménez, 2012. Procedimiento para la rehabilitación minero-ambiental de yacimientos piríticos polimetálicos cubanos Minería y Geología 28:4, 20-40.

Mueller JG, Cerniglia CE, Pritchard PH (1996) Bioremediation of environments contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons. In: Bioremediation: principles and applications. Cambridge University Press, Cambridge, pp 125–194

Pavlovic P., (2018) Ecological Potential of Plants for Phytoremediation and Ecorestoration of Fly Ash Deposits and Mine Wastes. Front. Environ. Sci. 6:124. doi: 10.3389/fenvs.2018.00124

Pesson, P., 1998. Ecología forestal. Editorial Mundi-Prensa, Madrid. Pp 393.

Peñailillo B. Sergio., (2009) Desarrollo de un proyecto minero, curso de minería para periodistas. Santiago de Chile.

Philp JC, Atlas RM (2005) Bioremediation of contaminated soils and aquifers.
In: Atlas RM, Philp.

Quintero Ruíz, T., 2001. Cierre de minas: un enfoque sustentable, trabajo escrito para obtener el grado de especialidad en desarrollo sustentable. Tesis maestría, Universidad de Sonora.

Ramírez, N, 1997. Biología reproductiva y selección de especies nativas para la recuperación de áreas degradadas; método y significado. Acta bot. Venez. 20(1): 43-66.

Ramirez Sánchez, Miguel Ángel (1988), "La nueva minería sonorense: historia reciente de una vieja industria", en José Carlos Ramirez (coord.), La nueva industrialización en Sonora: el caso de los sectores de alta tecnología, Hermosillo, Sonora, El Colegio de Sonora.

Rani, N., Sharma H., Kaushik A., and Sagar A.(2018), Bioremediation of mined wasteland, Handbook of environmental materials management, Editorial C.M.Hussain.

Rondón R., J. A., & R. Vidal, 2005. "Establecimiento de la cubierta vegetal en áreas degradadas (principios y métodos)." Revista Forestal Latinoamericana, no. 38, p. 63

Saavedra, R. M., & Hernández Rabagó, P. Y. (2015). Mi México es minero. México: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México A.C.

Saiz de omeñaca J. A., Gutierrez de Loma M.G., Prieto Rodriguez, A. (2012), Trasplante de grandes árboles, Revista Foresta 53, 46-53.

Saiz J. *et al*, 2009. Recuperación de suelos e integración paisajística en áreas degradadas por explotaciones mineras en la faja pirítica andaluza. IV congreso forestal español. Pp 8.

Santiago N., 2008. Caracterización poblacional de arbóreas en el campus Buenavista universidad autónoma agraria Antonio Navarro. Tesis Universidad Autónoma Agraria Antonio Navarro. Pp 44.

Secretaria de Economía, Gobierno del Estado de Sonora (2017). Panorama minero del Estado de Sonora. Editor Servicio Geológico Mexicano (SGM). 85pp.

Sheoran, V.; Sheoran, A. S.; & Poonia, P. 2010. "Soil Reclamation of Abandoned Mine Land by Revegetation: A Review," International Journal of Soil, Sediment and Water 3:2, Pp 110.

Solomon, F, Katz, E and Lovel, R 2008, Social dimensions of mining: Research, policy and practice challenges for the minerals industry in Australia, Resource Policy, Vol.33, pp. 142-149.

Suarez Beltran R.M. 2013. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad libre instituto de postgrados ingeniería especialización en gerencia ambiental Bogotá D.C

Suorinen, F. T. (2015). The Future of Mega Data in Virtual Reality Environments in Mining Practice. Sydney: Thinkrox Inc.

UNISON, 2000. Caso de estudio "mina La Colorada" Universidad de Sonora, Exploraciones El Dorado S.A. de C.V.

Universidad de Alicante (2019) recuperado de:
<https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>

Valiente-Banuet, A., & Ezcurra, E. (1991). Shade as a cause of the association between the cactus *Neobuxbaumia tetetzo* and the nurse plant *Mimosa luisana* in the Tehuacan Valley, Mexico. *The Journal of Ecology*, 961-971.

Vidali, M. (2001) Bioremediation- An overview. *Pure Appl. Chem.*, Vol. 73, No. 7, pp. 1163–1172

Wall E., Pelon R., (2011) The Experience with Foundations, Trusts, and Funds, World Bank Group's Oil, Gas, and Mining Unit. *Sharing mining*.

5 Anexos

Fig. A1



Fig. A2



Fig. B1



Fig. B2



Figura C1



Figura C2



Figura D1



Figura D2



Figura E1



Figura E2



Figura F1



Tabla 1: Concentración elemental obtenida mediante análisis PXRF para los sitios de tepetate y topsoil en la Muestra total.

ELEMENTOS	
TEPETATE	(Au-Se-Hg-Co>Te-Sn-Cd-Ag-Pd-Nd-Pr-Ce-La-Bi-P-Al-Mg)>Nb>U>Sb>Th>Y>Cs>Ni>Cr>As>W>Sc>V>Cu>Zr>Rb>Mo>Pb>Zn>Ba>S>Si>Cl>Mn>Ti>K>Ca>Fe
TOPSOIL	(Mo-U-Pb-Au-Se-Hg-W-Ni-Co-S-Ba-Cs-Te-Sb-Sn-Cd-Ag-Pd-Nd-Pr-Ce-La-Bi-P-Al-Mg)Th>Nb>As>Y>Cu>Rb>Cr>V>Sc>Sr>Zr>Zn>Mn>Cl>Si>Ti>K>Fe>Ca

Tabla 2: Concentración elemental en muestra total (M.T.) para los sitios de tepetate y top soil

Elementos	Topsoil	Tepetate
Fe	31803.71±43.67578	51745.32±189.0528
Mn	723.61±16.3682	2495.36±40.6265
Ca	88996.417±231.24306	32560.173±251.77278
K	11843.79±32.61609	22415.93±165.2625

Concentración a 18mm.

Elementos	Topsoil	Tepetate
Fe	43748.93±51.95769	31819.39±51.43079
Mn	603.593±9.90932	1757.21±31.087
Ca	61511.293±226.82787	10426.073±59.27526
K	8625.983±42.24549	11960.17±87.50785

Concentración a 35mm.

Elementos	Topsoil	Tepetate
Fe	34658.07±141.7997	43648.41±62.48699
Mn	729.413±8.12555	2113.84±18.7988
Ca	83450.68±404.55976	19348.957±122.76844
K	10444.55±51.05177	20321.21±152.3859

Concentración a 60mm.

Elementos	Topsoil	Tepetate
Fe	31646.49±44.38883	44532.75±74.46511
Mn	1026.11±31.1059	2313.86±20.6958
Ca	95408.92±254.23806	26329.057±45.232555
K	11275.36±125.9638	21315.32±109.643

Concentración a 120mm.

Elementos	Topsoil	Tepetate
Fe	31152.98±109.126	47213±99.51951
Mn	748.997±20.5263	2508.07±52.2083
Ca	81213.303±148.1623	30144.837±146.98874
K	9792.447±47.96582	21751.77±54.47132

Concentración a 230mm.

Elementos	Topsoil	Tepetate
Fe	31655.42±123.6055	52879.95±112.7755
Mn	654.217±22.0067	2761.92±33.7356
Ca	74586.293±120.5377	31641.113±151.8978
K	10975.95±121.9855	21976.51±157.3182

Concentración a ^230mm.

Elementos	Topsoil	Tepetate
Fe	35968.8±307.6711	62164.64±142.6072
Mn	662.393±26.9126	2962.97±20.6882
Ca	76500.753±3255.2852	31021.617±65.563641
K	9653.62±382.5737	19951.55±78.5611