



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“CRECIMIENTO Y ADAPTACIÓN DE LAS ESPECIES MAGUEY
DE MONTAÑA (*AGAVE SALMIANA*) Y CACTUS LIRIO DE
PASCUA (*ECHINOPSIS OXIGONA*) EN PRESENCIA DE BPCV
PARA JALES”**

TESIS PROFESIONAL

Para Obtener El Título De:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

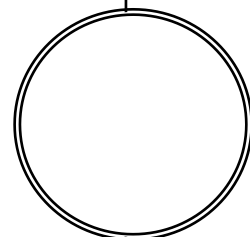
Presenta:

MADAI PÉREZ SEDANO

Directora de Tesis: Dra. Maribel Castillo Morales

Codirectora de Tesis: Dra. Janette Arriola Morales

Puebla, Puebla Julio 2025



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme vivir esta experiencia y culminar esta etapa, porque solo tu eres mi fuerza y mi escudo, mi corazón en Él confía; de Él recibo guía día con día.

A mis padres quienes han confiado en mí y me han apoyado siempre, porque gracias al esfuerzo que hacen día a día y a pesar de las dificultades hoy tengo la oportunidad de culminar este proceso, gracias por las lecciones que me dan día con día y sobre todo por instruirme en el camino de Dios, ustedes son mi inspiración y los admiro en todos los aspectos porque nunca se han rendido, hoy este éxito es de ustedes y mío, porque ambas partes hicimos el esfuerzo, muchas gracias, los amó.

A Dra. Maribel por ser una excelente docente y permitirme trabajar con ella desde el primer momento que me acerque, quién me ha asesorado y guiado a darle estructura a la presente tesis, gracias por el tiempo, dedicación y confianza que ha puesto en mí y en este trabajo, quién me ayudo a no desviarme hasta culminar este proceso, además de ser una persona extraordinaria y admirable, agradezco sus consejos y las grandes lecciones que me ha brindado.

A Dra. Janette, por sus valiosas observaciones que enriquecieron este trabajo, por su confianza, paciencia y por contribuir significativamente a mi formación académica y profesional.

A mis hermanos, gracias por cuidarme y apoyarme en este camino, gracias por estar ahí cuando más lo necesitaba, los quiero mucho.

A mis amigas Luz, Monserrat, Verónica, gracias por acompañarme en este tiempo y animarme, por estar al pendiente, y en especial doy gracias a Cristal quién confió en mí y se alegró por mis logros, por haberme impulsado a esforzarnos hasta llegar a la meta, te extrañaré siempre.

A todas aquellas personas que he conocido durante la universidad quienes me han impulsado durante este tiempo y me han dado palabras de aliento.

DEDICATORIA

A mis padres

Por su apoyo y amor incondicional, su esfuerzo constante y por ser mi guía en cada paso de mi vida personal y profesional. Gracias por enseñarme el valor del trabajo constante, la perseverancia, el respeto y a no rendirme jamás. Esta meta también es de ustedes.

A Cristal

Quien ya no está físicamente, pero cuya presencia y cariño siguen vivos en mi corazón. Gracias por tu luz, tu apoyo y por haber sido parte importante de mi vida. Esta tesis también lleva tu nombre y memoria.

ÍNDICE

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	9
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	10
GENERAL.....	10
ESPECÍFICOS.....	10
HIPÓTESIS	10
MARCO TEÓRICO	11
ANTECEDENTES	11
1. JALES MINEROS Y EPT EN LA HISTORIA DE MÉXICO	11
1.1 Importancia de la Minería en México.....	11
1.1.1 Definición de Minería.....	11
1.1.2 Panorama histórico de la minería en México.....	11
1.1.3 Importancia económica, social, política de la industria minera.....	12
1.1.4 Impacto económico, social y ambiental de la minería.....	13
1.1.5 Principales recursos minerales presentes en México.....	13
1.2 Antecedentes Históricos de la actividad minera en Zimapán, Hidalgo ...	14
1.2.1 Descripción geográfica.....	14
1.2.2 Orígenes de la actividad minera en la región.....	14
1.2.3 Principales recursos minerales.....	15
1.3 Antecedentes de biorremediación.....	15
1.3.1 Historia y evolución del concepto.....	15
1.3.2 Antecedentes de Fitorremediación.....	16
1.3.3 Hitos importantes en la investigación y aplicación de la fitorremediación.....	16
2. JALES MINEROS	17
2.1 Definición.....	17
2.2 Características de los jales mineros.....	17
2.3 Composición química de los jales mineros.....	18
2.3.1 Metales.....	18
2.3.2 Minerales no metálicos.....	18
2.3.3 Compuestos orgánicos.....	18

2.4	Impacto ambiental de Jales Mineros	19
2.4.1	Contaminación del suelo por lixiviación de los jales	20
2.4.2	Contaminación del agua por lixiviación de los jales	21
2.4.3	Impacto en la biodiversidad de los ecosistemas terrestres	21
2.4.4	Impacto en la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos	22
2.4.5	Riesgos para la salud por la exposición a los jales mineros	23
3.	PROBLEMAS ASOCIADOS A LA DISPERSIÓN DE EPT	23
3.1	Toxicidad de los EPT en el medio ambiente	23
3.2	Efecto de los EPT en el suelo	25
3.3	Toxicidad de los EPT en el Ser Humano	26
4.	MÉTODOS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR LA MINERÍA....	27
4.1	Biorremediación.....	27
4.1.1	Micorremediación	28
4.1.2	Bioaumentación.....	29
4.1.3	Bioestimulación	29
4.1.4	Fitorremediación (definición).....	29
4.2	Fitorremediación como técnica de tratamiento de contaminación por EPT	29
4.2.1	Interacción planta-suelo-contaminante que influyen en la eficacia de la fitorremediación	30
5.	MECANISMOS DE FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR EPT	31
5.1	Fitoestabilización	31
5.2	Fitoextracción	31
5.3	Fitovolatilización	32
5.4	Fitodegradación.....	32
5.5	Rizofiltración.....	32
5.6	Rizodegradación	32
6.	IMPORTANCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN	33
7.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FITORREMEDIACIÓN	33
7.1	Factores que afectan la eficacia de la fitorremediación	33
7.1.1	Contaminante	34
7.1.2	Especie Vegetal	34
7.1.3	Suelo.....	34
7.1.4	Microorganismos.....	35

7.1.5	Clima.....	35
7.2	Mecanismos de las Plantas para acumular EPT	35
7.3	Plantas Ornamentales en la Fitorremediación.....	36
8.	ESPECIES VEGETALES DE ESTUDIO	37
8.1	Magüey de montaña (<i>Agave Salmiana</i>).....	37
8.1.1	Origen	37
8.1.2	Características	37
8.1.3	Usos.....	38
8.1.4	<i>Agave Salmiana</i> en la fitorremediación.....	38
8.2	Cactus Lirio de Pascua (<i>Echinopsis Oxigona</i>).....	39
8.2.1	Origen	39
8.2.2	Características	39
8.2.3	Usos.....	39
8.3	<i>Echinopsis Oxigona</i> en la Fitorremediación.....	40
9.	CONTRIBUCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS	40
9.1	Fitorremediación asistida con Microorganismos.....	40
9.1.1	Papel de los microorganismos en la degradación y detoxificación de contaminantes presentes en los jales mineros	41
9.2	Fitorremediación asistida con Bacterias	41
9.3	Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (BPCV)	42
9.3.1	Función de las BPCV en suelos contaminados.....	43
10.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN	43
11.	MARCO LEGAL.....	45
11.1	Internacional	45
11.2	Nacional.....	46
11.3	Estatal	47
11.4	Municipal	48
12.	ÁREA DE ESTUDIO.....	49
12.1	Zimapán, Hidalgo	49
12.1.1	Ubicación Geográfica.....	49
12.1.2	Edafología	50
12.1.3	Climatología.....	51
12.1.4	Vegetación.....	52

12.1.5	Uso de Suelo	52
12.1.6	Hidrología	53
12.1.7	Topografía.....	53
12.1.8	Temperatura.....	54
12.1.9	Precipitación.....	55
METODOLOGÍA	.....	55
I.	Preparación de Inóculos Bacterianos	56
II.	Selección de Especies Vegetales.....	56
III.	Preparación de Unidades Experimentales.....	57
IV.	Plantación e inoculación	58
V.	Seguimiento y Monitoreo	59
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	.....	61
CONCLUSIONES	.....	75
ANEXOS	.....	76
REFERENCIAS	.....	86

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mundo enfrenta desafíos día a día y uno de ellos es el impacto que causa la contaminación al medio ambiente debido a las actividades antropogénicas, la minería es una de las actividades que fortalece la economía por lo que ha mejorado la calidad de vida de las personas y ha permanecido al pasar de los años, a nivel mundial estudios revelan que México se encuentra entre los principales productores mineros, por consecuencia existe una gran diversidad de minas en el territorio generando sitios de disposición de residuos mineros, tan solo en el país se estima una producción de 200 millones de toneladas anuales de jales. (INECC, 2012)

La consecuencia de los jales mineros se centra en la contaminación permanente del agua, los suelos y el aire, por lo que puede provocar daños a la salud pública originado por la generación de residuos durante la extracción y procesamiento de minerales, a estos residuos se les denomina jales o relaves los cuales contienen una gran cantidad de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) que pueden filtrarse en el suelo y el agua, alterando la biodiversidad y la salud de las comunidades cercanas a las minas. De esta manera ha ocasionado problemas de contaminación ambiental, provocando la afectación en la productividad en los suelos agrícolas, así como en la transferencia de compuestos tóxicos a los cuerpos de agua, aire y por supuesto a los alimentos. (Loyde de la Cruz et al., 2022)

El avance tecnológico en la extracción y procesamiento de minerales ha impulsado la utilización de metales base (cobre, plomo y zinc) tanto como de metales preciosos (oro, plata y platino), generando que la industria minera sea históricamente vital para el crecimiento de la economía y el progreso de diversos países. Sin embargo, la exploración, explotación y beneficio de estos metales ha provocado daños al ambiente principalmente por el manejo inadecuado y la disposición de residuos mineros (Moreno et al., 2012). El manejo inadecuado de los residuos puede resultar en la contaminación de ríos, lagos y acuíferos, así como en la pérdida de la biodiversidad y la degradación del suelo, este problema ha causado daños significativos al ambiente, entre ellos la alteración del suelo y la generación de drenaje ácido, que contamina suelos, aguas superficiales y subterráneas. Según Wong (2003), las actividades mineras alteran el suelo, generando anomalías biogeoquímicas que afectan negativamente la calidad del suelo y su biota, al aumentar los microelementos a niveles que afectan la actividad y diversidad de los organismos del suelo y la descomposición de la materia orgánica.

En regiones como Zimapán ubicado en el estado de Hidalgo, a lo largo de muchos años ha sido un importante centro de producción de metales como oro, plata, plomo, zinc y cobre gracias a la explotación minera, por lo que esta actividad ha generado grandes cantidades de residuos mineros provocando la contaminación por EPT principalmente a través de los jales, afectando gravemente la salud de la población, generando problemas como irritación en la garganta, los ojos y enfermedades infecciosas.

De acuerdo con un estudio realizado por Moreno Tovar, R., Barbanson, L., & Coreño Alonso, O., en 2009 con el objetivo de determinar la neoformación mineralógica para definir el comportamiento químico de los EPT, su impacto al ambiente y a la salud en el distrito de Zimapan, concluyeron que los residuos (jales) muestran un alto contenido de metales cuya concentración es muy variable. La presencia de Cd y Bi, pueden tener un significado de tipo ambiental, al ser liberados por los procesos de meteorización que actúan en las presas de jales, por lo que estos residuos pueden considerarse potencialmente tóxicos. Por lo que es crucial desarrollar tecnologías para abordar esta problemática y proteger a las comunidades afectadas.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es factible la adaptación y crecimiento de las especies Maguey de montaña (*Agave Salmiana*) y Cactus Lirio de Pascua (*Echinopsis Oxigona*) asistida con BPCV en jales mineros?

JUSTIFICACIÓN

En la sociedad actual, se ha observado un incremento en la emisión de sustancias contaminantes al medio ambiente, sobre todo aquellas provenientes de distintas actividades como la industrial, agropecuaria, artesanal, doméstica y minera. Dentro de esta última, se destacan los desechos generados por la actividad minera, conocidos como jales, los cuales representan un problema tanto ambiental como de salud debido a que están compuestos por partículas muy pequeñas que pueden dispersarse fácilmente a través del agua o el viento. La contaminación del suelo por EPT difiere de la contaminación del aire o agua, ya que los EPT permanecen en el suelo por largos períodos de tiempo. Algunos EPT como el cobre y el zinc pueden ser relativamente inofensivos en términos de exposición, sin embargo, otros como el plomo y cadmio son altamente dañinos y pueden desencadenar diversas enfermedades como problemas cardiovasculares y cáncer, incluso en cantidades mínimas.

Ante la amenaza que representa la presencia de estos compuestos para los seres vivos, se han creado diversas estrategias para mitigar su impacto. Las técnicas convencionales suelen ser costosas y pueden causar daños permanentes en las propiedades del suelo, del agua y de los seres vivos que lo habitan. Por ello, es necesario encontrar alternativas eficaces y que no representen altos costos para reducir la contaminación provocada por estos elementos tóxicos, comunes en las sociedades industrializadas. La utilización de plantas y microorganismos benéficos en la técnica de fitorremediación ha demostrado ser una opción efectiva para limpiar los suelos contaminados, a la vez que disminuye los gastos en comparación con las técnicas tradicionales, por el contrario, las tecnologías convencionales de remediación fisicoquímica para tratar suelos contaminados con EPT son costosas, demandantes en energía y tecnología, y causan un impacto significativo en el medio ambiente. Considerando a la fitorremediación una técnica emergente, respetuosa con el medio ambiente y económicamente eficiente para estabilizar o eliminar

los EPT, aprovechando la capacidad de las plantas para tolerar, extraer y acumular estos elementos en su biomasa.

Por otro lado, el empleo de bacterias que promueven el crecimiento de las plantas es una mejora adicional que ayuda a aumentar la eficacia del proceso de fitorremediación en zonas contaminadas, gracias a la asociación de las plantas con estos microorganismos que logran alterar la disponibilidad de los EPT en el suelo (Glick, 2010; Kidd et al., 2009). Además, esta asociación mejora tanto la resistencia de las plantas a estos elementos tóxicos como la producción de su biomasa. (Den-ton, 2007; Rajkumar et al., 2012)

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar la adaptación y crecimiento de Maguey de montaña (*Agave Salmiana*) y Cactus Lirio de Pascua (*Echinopsis Oxigona*) en presencia de BPCV para jales mineros.

ESPECÍFICOS

- Determinar % de supervivencia de ambas especies vegetales en jales mineros.
- Evaluar el crecimiento de las especies vegetales seleccionadas, mediante los siguientes parámetros: altura, ancho de planta (cactus), número de hojas, ancho de las hojas, longitud y cuantificación de raíces.
- Determinar la cepa bacteriana que tiene mayor capacidad de estimulación en el crecimiento de especies vegetales (*Agave Salmiana* y *Echinopsis Oxigona*) en jales mineros.

HIPÓTESIS

Alternativa: Las especies *Agave Salmiana* y *Echinopsis Oxigona* pueden adaptarse y crecer en presencia BPCV a diversas proporciones de Jales mineros.

Nula: Las especies *Agave Salmiana* y *Echinopsis Oxigona* no pueden adaptarse y crecer en presencia BPCV a diversas proporciones de Jales mineros.

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES

1. JALES MINEROS Y EPT EN LA HISTORIA DE MÉXICO

1.1 Importancia de la Minería en México

La minería es una actividad fundamental para el desarrollo de las sociedades modernas, durante la historia ha impulsado el crecimiento económico de muchos países, además de que los minerales que se extraen son utilizados en una gran cantidad de productos y procesos industriales, donde México no es la excepción, pues es considerado uno de los principales productores de minerales mundialmente, esto ayuda a solventar el mercado interno y son el principal insumo para las industrias del transporte, aeroespacial, telecomunicaciones y electrónica, entre otras (Outletminero, 2020), por lo que ha tenido minas en operación al pasar los años, y estas han sido una fuente importante de ingresos para el país. La industria minera ha tenido un papel central en la economía y en la vida del país. Por lo que la minería ha sido fundamental para el crecimiento de distintas industrias en México, país que se encuentra entre los principales productores a nivel mundial de minerales como plata, plomo, zinc, sal, yeso, oro y cobre, entre otros (Azamar A, Téllez I., 2022). La producción minera en México actualmente se concentra en doce entidades: Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco (Hernández M, 2005), por lo tanto, México cuenta con una riqueza mineral considerable, siendo la minería un impulso al desarrollo económico y social en las comunidades donde se lleva a cabo, generando empleos para la población.

1.1.1 Definición de Minería

La minería es el proceso de extracción de minerales útiles de la superficie de la Tierra, incluidos los mares. Un mineral, con algunas excepciones, es una sustancia inorgánica que se encuentra en la naturaleza y que tiene una composición química definida y propiedades físicas distintivas o estructura molecular (Clark et al., 2024).

Por lo que la minería se encarga de extraer sustancias minerales del interior de la corteza terrestre, las cuales pueden ser “sólidas (minerales, combustibles, y otras fuentes energéticas), líquidas (como el petróleo) y gaseosas (como el gas natural)” (Herrera J, 2017), las cuales son sustancias demandadas, transformadas en materias primas que satisfacen las necesidades para el desarrollo de la humanidad por medio de los mercados convirtiéndose en productos comercializados a un precio remunerador para la sociedad.

1.1.2 Panorama histórico de la minería en México

La minería en México cuenta con una larga trayectoria que se remonta a la época prehispánica, desde entonces nuestros antepasados extraían minerales como el oro, la plata y el cobre para elaborar objetos ornamentales y herramientas, siendo la extracción

de minerales una actividad que ha tomado un papel fundamental en la historia y en el desarrollo de la economía nacional desde entonces.

En el siglo XVI, con la llegada de los colonizadores españoles, la minería marco una gran trascendencia histórica, convirtiéndose en una actividad económica y social importante, colocando a México como uno de los principales productores de plata en el mundo, con ello la explotación de yacimientos de plata, oro, cobre, plomo, zinc, etc., se convirtieron en una actividad fundamental para la economía del país.

Posteriormente la minería se modernizó en el siglo XIX, al introducir tecnologías avanzadas y maquinaria, permitiendo una mayor eficiencia en la productividad y por lo tanto una mejor rentabilidad, además provocó un impacto a la sociedad mexicana, ya que la explotación de minerales generó empleos. Sin embargo, en el siglo XX la minería afrontó desafíos y controversias, como es el impacto ambiental que provoca la extracción de minerales y combustibles causando una preocupación cada vez mayor.

La destrucción de los ecosistemas, la contaminación del agua, aire, suelo y el agotamiento de recursos naturales fueron algunas de las consecuencias negativas de la minería en este siglo. Debido a ello la industria minera afronta desafíos que podrían determinar su futuro, ya que es clave enfrentar el conflicto entre la extracción de minerales y la conservación del medio ambiente.

1.1.3 Importancia económica, social, política de la industria minera

La industria minera en México ha sido un pilar fundamental en la economía, la sociedad y la política del país a lo largo de su historia.

En términos económicos, la extracción de recursos minerales es una de las actividades económicas más importantes para México, ya que está ha sido desde la época prehispánica una de las principales fuentes de ingresos económicos permitiendo el desarrollo del país, fortaleciendo la economía de la sociedad. La minería no sólo tiene un impacto directo en el Producto Interno Bruto (PIB) de un país, sino que también tiene un impacto multiplicador en la economía. En 2023, la minería contribuyó con el 2.5% aproximadamente al PIB de México. El sector minero-metalúrgico también es un importante generador de divisas para el país, así como es uno de los sectores que más atrae Inversión Extranjera Directa (IED) en México (Outletminero, 2024), además de generar impuestos y regalías, los cuales pueden ser utilizados para financiar servicios públicos como la educación, la salud y la infraestructura, ayudando a mejorar la calidad de vida de las personas e impulsando el desarrollo del país.

Desde una perspectiva social, la industria minera emplea a una gran cantidad de personas en diferentes regiones de México, proporcionando oportunidades de trabajo y desarrollo económico en lugares remotos y económicamente marginados. Sin embargo, también ha sido objeto de controversia debido a conflictos sociales relacionados con el impacto ambiental, los derechos de las comunidades locales y las condiciones laborales

de los trabajadores. La minería ha sido tanto fuente de riqueza como de desafíos para las comunidades indígenas y campesinas que a menudo residen en las zonas donde se desarrolla la actividad minera.

En el ámbito político, la industria minera ha ejercido una influencia considerable a lo largo de la historia de México. Durante la época colonial, la explotación de minerales fue una de las principales razones de la colonización española, y las minas eran controladas por la corona española y los empresarios europeos. En la actualidad, la regulación de la industria minera es responsabilidad del gobierno mexicano, equilibrando la atracción de inversiones extranjeras con la protección del medio ambiente y los derechos de las comunidades locales. La política minera también ha sido objeto de debates sobre soberanía nacional, desarrollo sostenible y distribución justa de beneficios.

1.1.4 Impacto económico, social y ambiental de la minería

Desde el punto de vista económico, la minería puede tener un impacto positivo al generar empleo, impulsar el crecimiento económico y contribuir a la balanza comercial de un país. Las empresas mineras suelen invertir dinero en infraestructura y tecnología, lo que puede beneficiar a las comunidades locales y regiones donde operan.

Sin embargo, el impacto social de la minería puede ser complejo y variado. La creación de empleo beneficia a las personas, pero también genera tensiones sociales, como los derechos de las comunidades locales, la participación y consulta ciudadana, y la distribución equitativa de los beneficios económicos. La minería también puede causar desplazamiento de comunidades, conflictos territoriales y tensiones culturales, especialmente en áreas rurales o indígenas donde se encuentran muchos yacimientos minerales.

Por último, el impacto ambiental de la minería es uno de los aspectos más preocupantes. La actividad minera puede provocar deforestación, contaminación del suelo, agua y del aire, pérdida de biodiversidad, y alteración irreversible de los ecosistemas. Los métodos de extracción, el manejo de desechos y el uso de productos químicos pueden tener efectos devastadores en las localidades y en la salud de las poblaciones cercanas. Además, la minería puede contribuir al cambio climático a través de la emisión de gases de efecto invernadero y la destrucción de sumideros de carbono.

1.1.5 Principales recursos minerales presentes en México

México es considerado dentro de los 10 principales productores de 17 minerales, posicionándose como el principal productor de plata a nivel global, seguido de la Fluorita, tercero en Sulfato de Sodio y Wollastonita, cuarto Celestita, quinto Plomo, Molibdeno, Barita, Diatomita, Sulfato de Magnesio, sexto en Zinc, octavo Sal, Yeso, Cadmio, Oro y Feldespato y décimo en Cobre. (Secretaría de Economía, 2024)

La actividad minera se concentra en casi todo el país, existen cuatro estados que concentran el 73 por ciento de la producción: Sonora (27.5 %), Zacatecas (24.9 %),

Chihuahua (11.6 %) y Coahuila (9 %). Otros estados con importante actividad minera son: Durango, Sinaloa, Jalisco, Oaxaca, Guerrero y Nayarit. (de la Fuente, s/f)

1.2 Antecedentes Históricos de la actividad minera en Zimapán, Hidalgo

1.2.1 Descripción geográfica

El Municipio de Zimapán se localiza al noroeste del Hidalgo, ubicado a 144 kilómetros de Pachuca, con coordenadas UTM 460267.554 E, 2293097.527 N, a una altitud de 1,780 m.

Limita al norte con los municipios de Pacula, al Noreste con Jacala; al sur con los municipios de Tecozautla y Tasquillo e Ixmiquilpan; al este con Nicolás Flores y al oeste con el Estado de Querétaro. Sus principales comunidades son: Xaha, Aguas Blancas, Xitha, el Cerrote, Morelos, Encarnación y Durango. Cuenta con una extensión territorial de 871.84 Km², representando un 4.19% de la superficie del Estado. (Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, 2011)

1.2.2 Orígenes de la actividad minera en la región

La principal actividad económica en Zimapán, Hidalgo ha sido la minería, está actividad se vincula a una larga historia de la explotación minera, aunque se tienen dudas de la fecha de inicio, Cubillo Moreno 1991, menciona que los Aztecas tenían minas de oro y plata en Zimapán antes de la llegada de los españoles. Canudas 2005, menciona que, desde inicios de nuestra Era, la minería era realizada por Teotihuacanos, Otomíes y Toltecas que trabajaban y pulían la Obsidiana (Elizondo C., Gutiérrez P. y Marín M, s/f), por lo que para muchos investigadores el origen de la explotación minera se remonta al periodo prehispánico (Meneses J, 2015) debido a que se desarrollaban actividades de extracción de piedras y metales.

En el año de 1801, Andrés Manuel de Río, descubrió un nuevo elemento de la tabla periódica, por supuesto este acontecimiento tuvo relevancia 30 años después cuando por fin le dieron el reconocimiento del descubrimiento del Vanadio (Va), dicho elemento Manuel del Río lo descubrió a partir de una serie de exploraciones que realizaba en la mina de la Purísima del Cardonal en Zimapán, hoy estado de Hidalgo, pero estas mina no fueron descubiertas en el siglo XIX, sino que llevaban más de dos siglos explotándolas. Son parte de una región minera que desde el siglo XVI rindió frutos a los mineros españoles que exploraron la Nueva España y descubrieron beneficios de la plata. La zona minera creció en el Valle del Mezquital junto a Ixmiquilpan, Cardonal, Actopan, Capula, Tlahuelilpan, Pachuca Real del Monte y Real de Atotonilco. Se menciona que por Zimapán paso Hernán Cortes en su paso a la conquista del Panuco y observo a los indígenas con adornos de metal en sus orejas y pecho, sin embargo, la explotación minera en Zimapán comenzó en 1576. De acuerdo con la relación de dicho lugar estas minas estaban divididas en tres partes Tulimán y Monte que estaban en tierra muy áspera y otra parte era llamada Santiago y se encontraba en los cerros bajos, en las

tres partes se extraía plata y sobre todo plomo, las minas de Zimapán fueron ejemplo durante el siglo XVII de la concentración de la población en torno a la minería y sobre todo el enriquecimiento económico que ésta provocaba pues el comercio de todo tipo de productos en la zona se desarrolló (Palacio de minería, 2021).

1.2.3 Principales recursos minerales

En el municipio existen yacimientos de minerales metálicos, no metálicos, rocas dimensionables, agregados pétreos y gemas o piedras semipreciosas. Entre los principales minerales metálicos en minas principales en explotación son: Plata (Ag), Plomo (Pb), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn) y Oro (Au) (Solana J., 2008), los minerales no metálicos son: Carbonato de Calcio, Caliza, Dolomita y Fosforita (Servicio Geológico Mexicano, 2011).

1.3 Antecedentes de biorremediación

1.3.1 Historia y evolución del concepto

La Biorremediación es un proceso natural, que surgió con el planeta, como mecanismos de reciclaje de nutrientes que permite al planeta, sustentar las distintas formas de vida, mantener la homeostasis planetaria y garantizar el flujo permanente de materia y energía entre los organismos vivos y el ambiente; flujo conocido como metabolismo (Gualoto M. y Oña T, 2022).

Desde el siglo XIX, aunque aún no se utilizaba el término “biorremediación”, los científicos ya observaban como los microorganismos podían descomponer materia orgánica, tal es el caso de Louis Pasteur que estudió como las bacterias desempeñan un papel crucial en la descomposición de materiales biológicos.

Los microbiólogos han estudiado el proceso desde la década de 1940, ZoBell en 1946 revisó la acción de microorganismos sobre hidrocarburos. Él reconoció que muchos microorganismos, tienen la capacidad de utilizar hidrocarburos como única fuente de energía (UnADM, s/f). La biorremediación que usa microorganismos fue inventada por el científico norteamericano George M. Robinson que trabajó como ingeniero de la compañía Santa María de California en la década de 1960 y se dedicó a experimentar con una serie de microbios en frascos contaminados de petróleo. (Remtavarez, 2010)

La Biorremediación se dio a conocer con mayor amplitud en Estados Unidos a finales de la década de 1980 como una tecnología para la limpieza de las costas contaminadas con petróleo. El derrame de petróleo del Exxon Valdez en marzo de 1989 en Prince William Sound, Alaska fue el catalizador de esta atención. A partir de 1989, la Biorremediación se ha convertido en una tecnología que se aplica en diferentes circunstancias. (UnADM, s/f)

Hasta hace algunos años la biorremediación no era muy conocida en algunos países, pero esta técnica ha tenido un gran avance por lo que se enfrenta al desafío de convencer a organismos oficiales y empresas de su enorme potencial y efectividad en la descontaminación. Este sector busca seguir mejorando aspectos clave, como el

transporte de nutrientes, la selección de microorganismos adecuados y el tratamiento de diferentes tipos de contaminantes.

1.3.2 Antecedentes de Fitorremediación

En el siglo XVIII Joseph Priestley Karl Scheele y Antoine Lavoisier demostraron que en presencia de la luz las plantas son capaces de descontaminar la atmósfera. Más tarde 1885, Baumann, un botánico alemán, encontró altas concentraciones de Zinc en las hojas de algunas plantas que crecían en lugares conteniendo cantidades elevadas de este metal. Sin embargo, no fue sino hasta los años 70 que se reconoció la habilidad de las plantas para limpiar aguas y suelos contaminados. Y así, en los años 90 surgió el concepto de “fitorremediación”. (Gómez M, 2015)

1.3.3 Hitos importantes en la investigación y aplicación de la fitorremediación

Antes de 1975, el uso de plantas para trabajar metales tiene referencias en varias culturas en todo el mundo desde antes del siglo XX (Neesse, 2013), aunque los primeros datos se remontan hasta 1855 con el descubrimiento de la especie “*Viola calaminaria*” en los reportes de Forchhammer y posteriormente confirmados en el año 1865 por Sachs, donde incluye la especie “*Thlaspi alpestre*” con concentraciones de zinc anormalmente altas en materia vegetal seca (Reeves R. D, 2006).

En 1995 los científicos ya habían identificado en la naturaleza algunas plantas que toleraban altas concentraciones de EPT denominadas “plantas hiperacumuladoras”, el paso siguiente fue usarlas con propósitos de descontaminación tanto en suelos como en aguas, lo que se nombró más adelante como “fitorremediación” de EPT (Contreras Y, 2021).

Las especies acumuladoras de metales se pueden utilizar para la fitorremediación (eliminación de contaminantes de los suelos) o la fitominería (cultivo de plantas para cosechar los metales). Además, dado que muchos de los metales que se pueden hiperacumular también son nutrientes esenciales, la fortificación de los alimentos y la fitorremediación podrían considerarse dos caras de la misma moneda. Mas allá de un interés ecológico y fisiológico, las plantas en el proceso de remediación tienen una considerable atención debido a la posibilidad de explotar económicamente su capacidad de acumulación en aplicaciones prácticas. Lo cual dio origen al campo de la fitominería (Rascio & Navari-Izzo, 2011)

En los últimos años ha surgido un enfoque en la combinación de fitorremediación con el uso de microorganismos (biorremediación) para mejorar la eficacia en la remediación ambiental, usando como complemento varias estrategias de fitorremediación y como parte de un esfuerzo por hacer que esta tecnología sea más eficaz, varios científicos han comenzado a explorar la posibilidad de utilizar varias bacterias del suelo junto con las plantas. Estas bacterias incluyen bacterias biodegradantes, bacterias promotoras del

crecimiento de las plantas y bacterias que facilitan la fitorremediación por otros medios (Glick B.R, 2010).

2. JALES MINEROS

2.1 Definición

Los residuos mineros conocidos como relaves, colas (tailings) y en México comúnmente conocidos como “Jales”, por definición, “son aquellos residuos sólidos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales” de acuerdo a la NOM-141-SEMARNAT-2003, estos jales son acumulados en apilamientos de material molido los cuales quedan después de que los minerales de interés se extraen de las rocas que los contienen, en estos materiales se encuentran restos de los minerales que no se pudieron recuperar, partículas de los reactivos que se utilizaron para separar el mineral de la roca, la misma roca que contenía la mineralización y otros elementos. (Servicio Geológico Mexicano, 2019)

A manera de ejemplo, un mineral común contiene aproximadamente 6% de zinc y 3% de plomo, el cual al ser concentrado genera alrededor de 850 kilogramos de residuos sólidos y al mismo tiempo una cantidad similar de agua conteniendo en ella cerca de un kilogramo de sustancias químicas residuales, por cada tonelada de mineral procesado. El material concentrado se le conoce como cabeza y al residuo generado se le denomina “jal”. (Hernández M, 2005)

2.2 Características de los jales mineros

Los jales o relaves mineros son clasificados por Rossiter (2007) como tecnosuelos o tecnosoles, ya que son depósitos de materiales cuyas propiedades y funcionamiento están dominados por las actividades humanas técnicas; dentro de este grupo se incluyen a los materiales excavados desde la profundidad de la pedósfera donde no fueron influenciados previamente por procesos superficiales, con propiedades sustancialmente distintas a las del ambiente donde son depositados.

Los jales mineros son residuos minerales de grano fino producidos durante el procesamiento mineral y estos contienen metales valiosos, agua y elementos tóxicos que causan problemas ambientales (Adewuyi, S. O., Anani, A., & Luxbacher, K, 2024), son mezclas heterogéneas de diferentes sólidos suspendidos en agua contaminada por procesos que a menudo contiene múltiples especies solubles. La caracterización de sólidos en relaves minerales a menudo se considera en términos de tamaño de grano, los operadores mineros clasifican las fracciones de tamaño de los constituyentes sólidos en los relaves como "arena", "limo" y "arcilla" en función de una variedad de métodos y estándares (Wang, C., Harbottle, D., Liu, Q., & Xu, Z, 2014), al ser partículas finas facilitan la dispersión de las partículas por el viento o el agua, contribuyendo a la contaminación ambiental, asimismo son caracterizados por su mineralogía, los jales presentan una mineralogía variable y compleja constituida por calcosilicatos, sulfuros, sulfosales,

elementos como el As, Sb, Se, Zn, Cu, Pb, Cd, Bi y Mn, destacan por sus altas concentraciones, los cuales pueden ser considerados Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) (Moreno T, et al., 2012). Entre las características estructurales de los depósitos de jales se encuentran la morfología, las dimensiones, la presencia de estructuras de contención como presas u otros elementos que confinen los materiales, la existencia de una cubierta vegetal, las pendientes de los taludes, la susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, así como el posible colapso de los materiales (Vick, 1990; Rivera Castelo, 2009; Cruz Ruiz, 2017).

2.3 Composición química de los jales mineros

Los jales comúnmente muestran una amplia y aleatoria variabilidad en su composición geoquímica y mineralógica, por lo que en muchos casos es única para cada distrito minero. La composición de un jal generalmente corresponde con la combinación de todas las variables intrínsecas de su contexto geológico, así como con los diversos procesos metalúrgicos utilizados. (Jambor, 1994; Jamieson, 2011)

La composición química de los jales mineros tiene una amplia variabilidad de elementos, que pueden clasificarse en metales, no metales y compuestos orgánicos, los cuales provienen del proceso de extracción y concentración de minerales.

2.3.1 Metales

Los jales mineros contienen principalmente metales pesados a los cuales se les denominan Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), estos se encuentran en concentraciones residuales debido a la incompleta extracción de los minerales, lo que les otorga propiedades tóxicas y contaminantes.

Los EPT más comunes derivados de los procesos mineros, en el caso de México son: Pb, Cd, Zn, As, Se, y Hg (Gutiérrez y Moreno, 1997). Siendo el Plomo y el Cadmio de los contaminantes encontrados con más frecuencia en las zonas mineras de México (SEMARNAT, 2004)

2.3.2 Minerales no metálicos

En algunos estudios realizados se ha determinado que entre los principales minerales no metálicos por los que se encuentran constituidos los depósitos de jales mineros son principalmente silicatos, fundamentalmente cuarzo (SiO_2) y carbonatos, mayormente calcita (CaCO_3), asimismo se ha encontrado magnetita y en muy poca proporción covelita (Cu_2S) (Medel Reyes, et al., 2008; Moreno T, et al., 2012; Ramos M, et al., 2012).

2.3.3 Compuestos orgánicos

Cabe señalar que los jales mineros también contienen compuestos orgánicos, aunque estos se encuentran presentes en una mínima cantidad, dado que provienen de los reactivos químicos utilizados durante los procesos de extracción y concentración mineral, algunos de ellos provienen de los hidrocarburos utilizados en la minería, estos son sustancias compuestas por carbono e hidrógeno que se utilizan como fuentes de energía

y materia prima en esta industria. Estas sustancias son fundamentales para el funcionamiento de la maquinaria y equipos, así como para la fabricación de productos químicos necesarios en el proceso minero. (MBGS, s/f)

Los metales juegan un papel importante en el desarrollo industrial, el cual ha experimentado notables cambios en las últimas décadas (Molina I, 2018), implementando nuevas estrategias como es el uso de ácidos orgánicos como reactivos principales en los procesos de lixiviación, generando que estos se encuentren presentes en los residuos mineros, aunque en menores cantidades en comparación con los metales.

2.4 Impacto ambiental de Jales Mineros

Una de las actividades de suma importancia económica es la minería, sin embargo, los procesos que conlleva esta actividad generan grandes cantidades de desechos, estos desechos son depositados en los jales mineros, que contienen grandes concentraciones de sustancias tóxicas que son potencialmente dañinas para el medio ambiente (Gao X. et al., 2021), provocando una gran variedad de impactos ambientales, uno de los daños resultantes de la actividad minera es la pérdida de la vegetación en los sitios de interés para la obtención de los minerales.

En la siguiente tabla se presentan un resumen de los posibles impactos ambientales que causa la actividad minera mundialmente en la biodiversidad:

Tabla 1. Posibles impactos de la actividad minera sobre la biodiversidad

Impacto	Descripción
Pérdida de hábitat	La eliminación de vegetación y alteración del suelo conduce a la pérdida significativa de hábitats, especialmente en áreas de alta biodiversidad como bosques tropicales y humedales.
Contaminación del agua y del suelo	La generación de drenaje ácido de mina y liberación de EPT contamina los ecosistemas acuáticos y terrestres circundantes.
Fragmentación de ecosistemas	La minería interrumpe las rutas migratorias de la fauna y afecta la integridad ecológica de grandes áreas.
Impacto en la biodiversidad acuática	La minería cerca de cuerpos de agua impacta negativamente la biodiversidad acuática, afectando la calidad del agua y los hábitats.
Cambio climático	La minería y el procesamiento de minerales contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero, afectando la biodiversidad a nivel global.

Fuente: Montes 2023.

Asimismo, en esta actividad se desechan grandes cantidades de rocas molidas una vez que han sido extraídos los minerales de interés, estos no son útiles en la minería y se les denominan relaves, colas o jales, los cuales cuentan con una gran cantidad de toxinas (Márquez R., Martínez C., & Osorio M., 2022). Estos residuos presentan EPT, manifestándose en metales y metaloides (Montes J, 2016), que al interactuar con el ambiente genera un proceso químico denominado Drenaje Acido de Mina (DAM), el cual se refiere a la interacción que sucede entre los minerales con moléculas de oxígeno y agua provocando la lixiviación de estos, aumentando el pH (Aduvire O, 2006), generando

problemas de salud y ambientales. La acumulación de relaves en las minas de todo el mundo ha creado varios desafíos, como la ocupación de grandes porciones de espacio terrestre, la contaminación del agua, del aire y del suelo, la intoxicación de los acuíferos, los conflictos ambientales y la muerte catastrófica de personas debido a las fallas de los depósitos de relaves (Adewuyi, S. O., et al., 2024).

Los residuos de la industria minera impactan el entorno ecológico mediante dos vías principales: la primera por dispersión (eólica e hídrica), esta representa un peligro al ambiente por la presencia de EPT en los jales mineros ya que estos son partículas muy finas menores a 2.5 μm , para la dispersión eólica, al ser partículas muy finas pueden permanecer en el aire, en forma de partículas suspendidas y dispersarse por cientos de Kilómetros afectando la biota y calidad del suelo, para el caso de la dispersión hídrica, dependiendo de la cantidad de precipitación y las escorrentías superficiales pueden transportar los contaminantes hacia las áreas cercanas. La segunda vía que ocasiona modificaciones al ambiente debido a los jales es la lixiviación del contaminante que se refiere al proceso mediante el cual un metal o mineral se disuelve en contacto con un líquido, en este contexto, al entrar en contacto los jales con el oxígeno y el agua experimentan reacciones de oxidación que liberan EPT, los cuales pueden contaminar fuentes de abastecimiento de agua, así como los ecosistemas circundantes. (Medel A, 2009)

2.4.1 Contaminación del suelo por lixiviación de los jales

La contaminación a causa de las actividades mineras genera un impacto significativo en los suelos, una de las principales formas en las que sucede es a través de la liberación de sustancias tóxicas en el proceso de extracción y procesamiento de minerales, estas sustancias químicas como los EPT y compuestos de cianuro pueden filtrarse en el suelo y contaminarlo. Esto sucede por fugas o derrames de sustancias tóxicas durante el transporte y almacenamiento de los minerales, así como por la lixiviación de los jales, el cual es un proceso en donde las sustancias químicas tóxicas se disuelven en el agua por la precipitación de la lluvia o en el agua subterránea y posteriormente se infiltra al suelo. Las sustancias tóxicas pueden persistir en suelo por décadas, por lo que ocasiona graves consecuencias en la calidad de los suelos alterando su estructura y composición, afectando la capacidad de retención de agua y nutrientes esenciales para el crecimiento de la vegetación, lo que puede provocar la erosión y degradación del suelo, así como la pérdida de su fertilidad. (Todoingenierías, 2023)

Los suelos que permanecen después de una explotación minera contienen una diversidad de residuos, escombros estériles, etc., lo que genera ciertos obstáculos para el crecimiento de la vegetación, además de ello entre las características más destacadas de estos suelos presentan: desequilibrio en la textura del suelo, escasa presencia de estructura edáfica, propiedades químicas anómalas, disminución en los nutrientes esenciales, además presenta la disrupción de los ciclos biogeoquímicos, baja profundidad efectiva del suelo, dificultades para el enraizamiento de la vegetación, baja

capacidad de intercambio catiónico, poca retención de agua y la presencia de compuestos tóxicos (García & Dorronsoro, 2002).

2.4.2 Contaminación del agua por lixiviación de los jales

Una de las preocupaciones más importantes relacionado con los embalses de jales mineros es la generación de Drenaje de Ácido de Mina (DAM). Este proceso químico se presenta cuando los minerales sulfurosos presentes en los jales mineros entran en contacto con el agua y el oxígeno, produciendo ácido sulfúrico, por lo que el DAM aumenta la acidez del agua y facilita la disolución de EPT, lo que resulta en la contaminación de aguas superficiales (ríos, lagos) y subterráneas (Veolia wáter technologies, 2024), afectando la calidad del agua como los ecosistemas acuáticos.

El transporte de contaminantes provenientes de las minas mediante el agua ocurre a través de diversos procesos. Estos incluyen desde el arrastre de sedimentos hasta la percolación de elementos y compuestos solubles, los cuales se desplazan desde las zonas altas de las cuencas hidrográficas hacia áreas más bajas. Las zonas de mayor riesgo por acumulación son las áreas ribereñas, los sistemas acuáticos endorreicos y las aguas subterráneas poco profundas, donde los contaminantes tienden a concentrarse y causar mayores impactos ambientales. (Csavina J, et al., 2012)

Algunos informes señalan la problemática ambiental que los jales mineros representan para el ser humano, Cortinas de Nava (2008) destaca que incluso en condiciones normales de operación de los depósitos o presas de jales mineros, es posible que debido a tormentas o derrames de líquidos, se contaminen los cuerpos de agua utilizados para el abastecimiento, lo que puede ocasionar un deterioro en la calidad de agua, especialmente si los jales tienen un pH alterado o contienen EPT que puedan hacer que el agua sea temporal o permanentemente no apta para el consumo humano.

En regiones mineras como Zimapán, Hidalgo, se ha reportado casos donde las aguas han sido contaminadas por EPT debido a la lixiviación de jales mineros. Esta contaminación ha afectado tanto a las comunidades humanas cercanas como a los ecosistemas locales. (Macedo A, et al., s/f).

2.4.3 Impacto en la biodiversidad de los ecosistemas terrestres

Los impactos al medio ambiente por las actividades industriales de la minería son preocupante y significativa debido a que causan la pérdida de los ecosistemas en el lugar donde se realizan estas actividades, ya que implica la remoción local de todas las especies de plantas y animales, y de los procesos y funciones que existían en esos ecosistemas; afecta también la disponibilidad y calidad del agua y libera gran cantidad de partículas y emisiones tóxicas a la atmósfera. La devastación ocurre durante todo el ciclo minero, desde la exploración, extracción, beneficio y transformación de minerales, que incluyen los lixiviados y gases que se desprenden en los procesos de trituración, lavado, corrosión y mecanismos químicos de separación. (Olivera B., et al., 2018)

La biodiversidad se ve afectada por las actividades mineras, ya que para que estas se lleven a cabo se requiere de la remoción de grandes cantidades de suelos y rocas para lograr la extracción mineral, causando la destrucción de hábitats, por lo tanto se ocasiona la pérdida de la biodiversidad, además cabe señalar que debido a esta actividad se origina la liberación de EPT y productos químicos durante el proceso de extracción mineral y por consiguiente se encuentran presentes en los residuos, por lo cual pueden afectar la calidad del agua y el suelo, así como causa un impacto negativo a las especies terrestres, contribuyendo a la disminución de la biodiversidad, causando alteraciones a los ecosistemas y a las especies que dependen de ellos, provocando la pérdida de su hábitat. La remoción de suelos y la deforestación destruye los lugares donde las especies encuentran su refugio, alimento y reproducción, lo que puede llevar a la extinción de especies locales y a la disminución de la diversidad de flora y fauna en la zona afectada, causando un desequilibrio ecológico. (Riquezas Subterráneas, 2023)

Los EPT pueden entrar en los suelos agrícola y de pastoreo a través de procesos naturales, como la dispersión eólica y el ciclo del agua, así como por el riego con aguas contaminadas. Esto permite que los EPT se transfieran a las plantas y otras partes del ecosistema, ingresando así a la cadena alimentaria y afectando la salud de los animales y otros organismos. Inclusive cuando los niveles de contaminación son bajos, si la exposición es prolongada o recurrente, los efectos sobre los ciclos vegetativos pueden ser graves. (Paredes-Vilca, O. J., Jiménez Díaz, L., Dávila García, J., & Apaza Cruz, J., 2024).

2.4.4 Impacto en la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos

La minería produce grandes cantidades de desechos y en muchas ocasiones son depositados cerca de cuerpos de agua, los cuales son contaminados por las sustancias tóxicas presentes en los jales y ponen en riesgo la vida acuática. Los EPT y las sustancias químicas utilizadas en el proceso minero tienden acumularse en los tejidos de los organismos acuáticos, afectando su salud y capacidad reproductiva. Además, la extracción de minerales frecuentemente implica la alteración del curso de los ríos y la construcción de embalses o represas para almacenar agua, lo que altera el flujo natural y perjudica tanto a la vida acuática como a las comunidades que dependen de esos cuerpos de agua para su subsistencia. Asimismo, estos procesos pueden llevar a la desaparición de humedales y hábitats acuáticos vitales, que son esenciales para muchas especies. La destrucción de estos ecosistemas tiene un impacto duradero en la biodiversidad y en la salud de los ecosistemas acuáticos. (Flores A, 2023)

Los cuerpos de agua y su biota son impactados por la escorrentía derivada de la minería metálica, quedando disueltos en el agua o acumulados en el suelo o sedimentos. En vista del compartimento ambiental, los organismos expuestos absorben los contaminantes directamente del agua e indirectamente de las cadenas tróficas (Ali, H., Khan, E. y Ilahi, I., 2019)

De la misma manera los EPT, pueden entrar en las cadenas tróficas a través de la acumulación en especies acuáticas como microorganismos y la flora acuática que son el

alimento de los peces, que después pueden afectar a sus depredadores, especies de peces carnívoros, aves o mamíferos, incluyendo al ser humano, que pueden transportar estos contaminantes a diferentes ecosistemas. (Szyrkowska, M. I., Pawlaczyk, A. y Maćkiewicz, E., 2018)

2.4.5 Riesgos para la salud por la exposición a los jales mineros

Estudios han revelado que las actividades mineras son una de las ocupaciones que han ocasionado efectos nocivos a la salud humana a largo plazo, entre ellos han destacado problemas respiratorios como neumoconiosis, asbestosis y silicosis, asimismo debido a la exposición e inhalación de las partículas minerales finas de polvo producidas cuando se realizan las explosiones y perforaciones pueden provocar daños a los pulmones y cuando se inhalan cantidades excesivas de cuarzo o sílice puede provocar una enfermedad irreversible llamada silicosis (Planeta-Tierra, 2019), así como presentar reacciones alérgicas. La exposición humana a múltiples partículas pequeñas de los efluentes mineros, como polvo, uranio, hierro, plomo, zinc, silicio, titanio, azufre, nitrógeno, platino, cromo, vanadio, manganeso y mercurio, es un riesgo para la salud. Dichos elementos pueden tener varios efectos patológicos, como respiratorios y cardiovasculares, inflamación crónica múltiple y enfermedades neurodegenerativas. (da Silva-Rêgo, L. L., de Almeida, L. A., & Gasparotto, J., 2022).

La exposición a los jales mineros representa un riesgo a la salud humana, debido a que se ha demostrado que los jales contienen EPT, estos llegan a la población debido a la dispersión, ya que al ser muy pequeñas las partículas son capaces de formar aerosoles, por lo que se mantienen suspendidas en el aire y estas pueden ser inhaladas al respirar. Cuando las partículas son torácicas tienden a acumularse en el sistema respiratorio por lo que producen daños físicos si son solubles, toxicidad si se solubilizan y cuando las partículas son respirables pueden llegar al torrente sanguíneo, en cambio cuando son ingeridas pasan por el estómago y después por el intestino de lo cual la mayor parte es desechada, pero si son solubles pueden ser absorbidas en este órgano (Gavilán-García, Irma C., Ladino, Luis A., Franco, Eliacim, & Juárez, Javier. 2020). Por lo que, la población que vive en las regiones circundantes se encuentra expuesta a estos riesgos.

3. PROBLEMAS ASOCIADOS A LA DISPERSIÓN DE EPT

3.1 Toxicidad de los EPT en el medio ambiente

La liberación de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) de los sitios mineros ocurre principalmente a través de la erosión hídrica y el drenaje de los depósitos de desechos. Los EPT llegan a las aguas superficiales por el DAM, la descarga de residuos mineros o de procesamiento, las fallas de presas de relaves y la removilización de metales en suelos aluviales contaminados por la minería cerca de los ríos. Las fuentes puntuales importantes de contaminación del suelo por EPT también incluye la contaminación de las emisiones de las fundiciones, así como el polvo arrastrado por el viento de los relaves de las minas y los vertederos de escoria de las fundiciones. (Nieder, R. & Benbi, D., 2024).

Los EPT incluyen metales pesados con una densidad mayor a 5 g cm^{-3} y no metales, algunos de ellos son persistentes y pueden ser altamente tóxicos para las plantas, los animales y los seres humanos. Varios elementos biológicamente esenciales llamados micronutrientes u oligoelementos también se clasifican como EPT. Estos últimos se vuelven tóxicos cuando se producen en altas concentraciones y también son biodisponibles. Los no metales como el As y el Se también se clasifican como EPT, al igual que otros micronutrientes, el Se en bajas concentraciones realiza una serie de funciones de las plantas y los seres humanos (Nieder, R. & Benbi, D., 2024).

La constante exposición de los seres vivos a EPT se ha visto asociada a la actividad minera e industrial debido a que estos son liberados a la atmósfera por emisiones y al agua mediante vertidos, depositándose finalmente sobre la tierra. (Yélamos, C, 2021). En los sistemas ecológicos, los EPT pueden alterar el equilibrio de los ecosistemas, lo que conduce a la pérdida de biodiversidad y la degradación de los ecosistemas (Green, I. D., Ginige, T. A., Demir, M., & Van Calster, P., 2021).

Los EPT más usados y conocidos por sus problemas medioambientales son: Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Zinc (Zn), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Magnesio (Mn) y Níquel (Ni) y otros elementos tóxicos más ligeros son: Aluminio (Al), Berilio (Be) y Arsénico (As), los cuales provienen de diferentes fuentes, tanto naturales como antrópicas o artificiales, la primera hace referencia a los minerales ricos en metales procedentes de la roca madre o volcanes y en la fuentes antrópicas se encuentran los yacimientos minerales, las industrias, fuentes de energía y todo aquello relacionado con su transporte (García-Astillero, A., 2018)

Para la extracción de los metales se requieren distintos procesos de extracción dependiendo del tipo de metal, por lo que se generan diferentes residuos, como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2. Residuos generados en la extracción de metales.

Metal	Residuo
Oro	Posiblemente tiene residuos de mercurio o de cianuro
Plata	Posiblemente tiene residuos de mercurio o de cianuro
Cobre	Residuos ácidos y elementos asociados como plomo
Zinc	Residuos ácidos y elementos asociados.
Cadmio	Cadmio o plomo
Plomo	El estaño, níquel, cobalto arsénico y el mismo plomo.
Arsénico	Actualmente hay montañas de ganga de este material
Hierro	Residuos ácidos y elementos asociados como fenoles y cresoles, amoníaco, compuestos de arsénico y sulfuros

Fuente: Adaptado de Arcos M, s/f.

Los EPT presentes en los residuos mineros ocasionan problemas al medio ambiente, los cuales se ven influenciados por el suelo, el viento, el agua y la gravedad para definir su

movilidad en los distintos medios, la distribución de los EPT puede causar la pérdida de las poblaciones de fauna del suelo y también puede influir en la fertilidad del suelo (Greenfield E, 2023).

La peligrosidad de los EPT radica del hecho de que puede ser directamente absorbidos por ciertos organismos incorporándose a los tejidos mediante el proceso de bioacumulación (Álvaro F. 2020), las elevadas concentraciones de dichos metales en el organismo de los seres vivos alteran los procesos bioquímicos y fisiológicos ocasionando diversas patologías. (Londoño-Franco, et al., 2016)

Normalmente, en un ecosistema, los primeros en absorber EPT son plantas, hongos o microorganismos, que generalmente entran en contacto directo con los suelos o las aguas, llegando a contaminarlos, sin embargo, estos elementos pueden trasladarse a otros niveles de la cadena trófica, como animales (Álvaro F. 2020), logrando llegar al organismo del ser humano.

3.2 Efecto de los EPT en el suelo

Al pasar los años, las civilizaciones han dependido en gran medida de los minerales que contienen metales disponibles en la corteza terrestre. Las actividades mineras como la trituración, la molienda, el lavado y la fundición de materiales mineros y otros procesos de extracción y tratamiento de metales producen grandes cantidades de residuos mineros. El impacto negativo de los jales mineros produce efectos adversos a las especies vegetales que crecen en ellos (Nieder, R. & Benbi, D., 2024).

La contaminación de los suelos por EPT es un problema ambiental que causa estrés abiótico por las altas concentraciones de contaminantes debido a las actividades antropogénicas, sin olvidar que los EPT también se encuentran de manera natural en el suelo (Shehata, S.M., Badawy, R.K. & Aboulsoud, Y.I.E. 2019).

En un estudio donde se analiza el efecto de los EPT en la multifuncionalidad del suelo en un sitio de fundición de plomo se concluyó que la contaminación por EPT limitó la multifuncionalidad del suelo al afectar el potencial regulador de la comunidad microbiana del suelo, la biomasa microbiana y la función. Por lo tanto, las pérdidas posteriores a la contaminación en la multifuncionalidad del suelo y el potencial regulador y la funcionalidad microbiana en conjunto podrían contribuir a la degradación del suelo, lo que perjudica las funciones ecosistémicas que proporciona el suelo. (Ke W, et al., 2023)

Los EPT pueden afectar negativamente las funciones del suelo, por lo que puede reducir la fertilidad de los suelos e irrumpe el ciclo de nutrientes al inhibir la actividad microbiana y reducir el crecimiento de las plantas. La toxicidad de los EPT y la reducción de los nutrientes como la materia orgánica pueden ocasionar directamente la pérdida de diversidad y función de las comunidades bacterianas y fúngicas, ya que los efectos tóxicos de los EPT y la menor disponibilidad de recursos limita el metabolismo y la composición de las comunidades microbianas (Ke W, et al., 2023).

3.3 Toxicidad de los EPT en el Ser Humano

La Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha dedicado a estudiar el gran impacto de los EPT sobre la salud de la población, asociando su presencia con enfermedades y muerte. (Yélamos, C, 2021). Los diferentes iones de EPT originan distintos efectos en la salud del ser humano.

Cabe mencionar que muchas especies están adaptadas a la presencia de los EPT en sus tejidos y es importante mencionar que muchos de estos elementos son nutrientes esenciales que cumplen diversas funciones en el organismo, sin embargo, las altas concentraciones pueden llegar a interferir en procesos metabólicos y provocar daños severos sobre la salud del ser humano y el ecosistema (Álvaro F., 2020).

Los EPT pueden ocasionar efectos nocivos significativos en la salud (Ambientum, 2024), como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Toxicidad de algunos EPT en la salud del ser humano.

EPT	Toxicidad	Fuente
Arsénico (As)	La toxicidad crónica con arsénico causa lesiones en piel y lesiones vasculares en sistema nervioso e hígado. Las complicaciones agudas aparecen por exposición a dosis elevadas y pueden ser letales, sus primeros efectos suelen ser fiebre, hepatomegalia, melanosis, arritmia cardíaca, neuropatía periférica, anemia y leucopenia. El arsénico está clasificado como sustancia cancerígena por la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer por sus siglas en inglés IARC.	Londoño-Franco, et al., 2016
Cadmio (Cd)	La concentración crítica del cadmio que produce daño en la corteza renal es de 200 µg/g, la dosis diaria para proteger la salud humana según la OMS es de 70 µg/g. En exposición crónica se observa anemia, disfunción renal, cálculos renales, osteoporosis, osteomalacia, trastornos respiratorios, hipertensión, trastornos nerviosos (cefalea, vértigo, alteración del sueño, temores, sudoración, contracciones musculares involuntarias), pérdida de peso y apetito, cáncer de próstata y pulmón. En intoxicación aguda hay neumonitis y edema pulmonar, gastroenteritis, náuseas, vómito, dolor abdominal, diarrea, fallo renal, y finalmente puede ocurrir aberraciones cromosómicas, efectos teratogénicos y congénitos. En riñón se puede acumular hasta por 30 años. Las altas concentraciones de Cd en el ser humano causan problemas nefrotóxicos y si es expuesto por tiempo prolongado, puede causar daño óseo.	Polo Bravo, C., & Sulca Quispe, L., 2019. Londoño-Franco, et al., 2016 Trujillo Peralta, F. A., López Avilés, G., Mondragón Ca marillo, L., & Calderón Alvarado, K. del C., 2023.

Plomo (Pb)	No es un elemento esencial para los humanos plantas y animales, es tóxico para humanos. Se encuentra en el aire, agua, polvo, suelo. La exposición a dosis elevadas de este elemento puede ocasionar una serie de efectos adversos a la salud, que incluyen daño cerebral severo, al sistema nervioso e incluso la muerte. En mujeres embarazadas puede provocar aborto, mientras que en hombres altera la espermatogénesis.	Polo Bravo, C., & Sulca Quispe, L., 2019. Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. 2017.
Mercurio (Hg)	Elemento tóxico para el humano, animales y plantas en forma de metil, el metilmercurio es neurotóxico, los peces y semillas contaminadas con mercurio han producido serios envenenamientos en humanos. Algunos de los efectos en la salud consisten en daños a diferentes órganos, principalmente el cerebro y los riñones, además de causar trastornos al sistema nervioso. La neurotoxicidad se manifiesta con temblores y pérdida de sensibilidad en dedos de ambas extremidades, pérdida de visión y audición, espasmos y finalmente coma y muerte.	Polo Bravo, C., & Sulca Quispe, L., 2019. Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. 2017. Londoño-Franco, et al., 2016
Aluminio (Al)	Puede generar daños en el sistema nervioso central, el sistema digestivo y los riñones.	Polo Bravo, C., & Sulca Quispe, L., 2019.
Cobre (Cu)	Los efectos agudos que puede causar son úlceras gastrointestinales, necrosis, hepática, y daño renal, su deficiencia puede producir anemia asociada a los problemas de absorción de hierro, desequilibrios mentales o nerviosos, problemas en los huesos, el sistema cardiovascular para lo cual el hígado tiene la capacidad de reciclarlo.	Polo Bravo, C., & Sulca Quispe, L., 2019.

Elaboración propia

4. MÉTODOS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR LA MINERÍA

4.1 Biorremediación

Hace algunos años se pensaba que teníamos suficientes recursos naturales, pero con el pasar de los años se han ido perdiendo debido a la contaminación que se ha originado debido al crecimiento de la población, la industrialización y la urbanización, por lo que se han buscado tecnologías que nos ayuden a mitigar esta problemática, una alternativa para limpiar los sitios contaminados es la biorremediación, ya que esta tecnología ofrece la posibilidad de disminuir o destruir diversos contaminantes empleando actividad biológica. (UnADM, s/f)

La biorremediación consiste en usar microbios para limpiar el agua subterránea y el suelo contaminados. Los microbios son organismos muy pequeños, como las bacterias, que

viven en el ambiente. La biorremediación estimula el crecimiento de determinados microbios que usan los contaminantes como fuente de alimento y energía. Algunos contaminantes que se tratan con biorremediación son el petróleo y algunos derivados, solventes y plaguicidas. (EPA, 2012)

Sin embargo, Van Deuren, et al., en 1997 define a la biorremediación como una tecnología emergente que utiliza organismos vivos (plantas, algas, hongos, bacterias) para remover (extraer), degradar o transformar los contaminantes y retirarlos, inactivarlos o atenuar su efecto en el suelo, agua y aire.

Por lo que podemos decir que la biorremediación es una tecnología encargada de utilizar sistemas biológicos que ayuden a contrarrestar y eliminar los desechos derivados de las actividades antropogénicas sin causar daños al medio ambiente.

La biorremediación se puede realizar en el sitio contaminado lo cual se le denomina biorremediación *in situ*, por el contrario, la biorremediación *ex situ* hace referencia a la remoción física del material contaminado de su lugar de origen para ser trasladado y tratado en otro sitio, (Cota-Ruiz, K., et al., 2019; Cognita Conecta, 2024), esta tecnología se ve afectada por distintos factores o parámetros los cuales son: la disponibilidad de nutrientes, la naturaleza de los contaminantes, como es el caso de los EPT, que debido a su estructura y su alta toxicidad, es muy complejo tratarlos, así también la textura del suelo puede facilitar el suministro de aire, agua y nutrientes a los microorganismos alterando la efectividad de la biorremediación, el pH del sitio contaminado, el contenido de humedad, temperatura y oxígeno (Mani D. & Kumar C., 2014).

A continuación, se presentan los conceptos de micorremediación, bioaumentación, bioestimulación y fitorremediación las cuales son tecnologías derivadas de la biorremediación, los cuales están directamente relacionados con el uso de organismos vivos para la eliminación de los contaminantes.

4.1.1 Micorremediación

La micorremediación es una tecnología de la biorremediación, esta palabra es la conjunción de dos palabras “mico” que proviene del griego “mykēs” que significa hongo y “remediación” que hace referencia a las técnicas y procesos para eliminar o reducir contaminantes hasta la recuperación de medio ambiente, por lo que el término micorremediación se define como “el uso de hongos para la degradación o eliminación de contaminantes”. Los hongos forman y liberan enzimas digestivas que son capaces de realizar los procesos de descontaminación. (Ramírez-Ramírez AA, 2024)

De acuerdo a unos estudios realizados se concluyó que los hongos autóctonos son capaces de realizar biorremediación de diversos EPT y contrarrestar el efecto letal sobre el medio ambiente y la salud del ser humano, así mismo son capaces de mejorar la calidad del suelo, sin embargo existe un inconveniente para la eliminación real de los EPT, debido a que se tienen que eliminar los hongos ya que acumulan los EPT dentro de ellos, por lo que aún se realizan investigaciones para desarrollar estrategias para superar esta limitación. (Akhtar N, Mannan MA, 2020)

4.1.2 Bioaumentación

La bioaumentación es la introducción de microorganismos que pueden biotransformar o biodegradar contaminantes, los microorganismos agregados pueden ser una especie completamente nueva o más miembros de la misma especie que ya existían en el sitio de estudio (Leung M, 2004). Es una estrategia dirigida a incrementar el número de microorganismos por unidad de volumen o masa de residuos o sustrato en tratamiento, esto mediante la inyección de microorganismos en el sistema de tratamiento, los microorganismos deben haber sido obtenidos *in situ*, pero cuando en el sitio no existen cepas con la capacidad de degradación del contaminante de interés se pueden emplear microorganismos aislados *ex situ* (Gualoto M. y Oña T, 2022).

La bioaumentación depende de varios factores como la competencia o capacidad de proliferación de las especies microbianas, la biodisponibilidad del compuesto xenobiótico y las propiedades fisicoquímicas del suelo (UnADM, s/f).

4.1.3 Bioestimulación

La bioestimulación se trata de anexar nutrientes, oxígeno, u otros donantes y aceptores de electrones al sitio designado con el fin de proliferar la población o la actividad de los microorganismos naturales disponibles para la biorremediación (Leung M, 2004), algunas de las fuentes adicionales a los sistemas de tratamientos son carbono (C), nitrógeno (N), azufre (S), calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), microelementos (Co, Mn, Mg, Cu, B, etc.), materia orgánica: como restos de vegetales, frutas (cítricos). (Gualoto M. y Oña T, 2022)

4.1.4 Fitorremediación (definición)

El término fitorremediación fue acuñado en 1991, este se conforma de dos partes “fito” proveniente del griego, que significa planta o vegetal y “remediar” procedente del latín *remediare*, que significa dar fin al daño, corregir o enmendar algo. Por lo que el término fitorremediación significa remediar un daño por medio de plantas o vegetales (Núñez R., et al., 2004). En una definición más amplia, la fitorremediación es una tecnología de la biorremediación que usa especies vegetales por su capacidad de absorber, volatilizar, tolerar, mineralizar y acumular altas concentraciones del contaminante permitiendo la remoción de estos (Cordero J, 2015), a partir de sus procesos bioquímicos realizados por la planta y microorganismos asociados a su sistema radicular (Núñez R., et al., 2004).

De acuerdo con las capacidades naturales de las plantas, se puede lograr la restauración de suelos y humedales contaminados, mediante las siguientes estrategias derivadas de la fitorremediación denominadas fitotecnologías: fitoestabilización, fitoextracción, fitovolatilización, fitodegradación, fitorestauración, rizofiltración, rizodegradación. (Clu-in, s/f)

4.2 Fitorremediación como técnica de tratamiento de contaminación por EPT

En los últimos años ha crecido el interés por estudiar el comportamiento de las plantas que pueden acumular altas cantidades de EPT en sus tejidos (Llugany, M., et al., 2007).

Estas plantas se les llama hiperacumuladoras, por lo que esta técnica de la biorremediación se le denomina fitorremediación la cual cuenta con la capacidad de remediar suelos, sedimentos y agua contaminados con EPT (Nieder, R. & Benbi, D., 2024). Este es uno de los métodos biológicos considerado como una alternativa eficiente, respetuosa y amigable con el medio ambiente, además de ser una de las tecnologías rentables a comparación con los tratamientos fisicoquímicos para la remediación de ecosistemas contaminados (Mani D. & Kumar C., 2014).

La fitorremediación es una tecnología ampliamente utilizada para el tratamiento de sitios contaminados con EPT, cuenta con algunos méritos estéticos a largo plazo, además de ser de bajo costo y naturaleza ecológica, por lo que se ha utilizado en áreas a gran escala con altas cantidades de EPT, hasta el momento se han identificado en diferentes estudios alrededor de 450 especies de plantas que tienen la capacidad de acumular altas concentraciones de EPT (Rascio y Navari-Izzo, 2011).

Las plantas hiperacumuladoras han recibido un gran interés debido a la posibilidad de explorar sus características de acumulación para aplicaciones prácticas, en especial para desarrollar tecnologías para la fitorremediación de suelos contaminados con EPT o para la extracción de metales valiosos de sitios mineralizados, cabe señalar que se requiere investigación más extensa en condiciones de campo, además que es de suma importancia comprender los mecanismos correctivos basados en hiperacumuladores, ya que pueden proporcionar información para optimizar la efectividad de la fitoextracción con prácticas agronómicas adecuadas, además de poder implementar biotecnología para desarrollar especies genéticamente modificadas (Rascio y Navari-Izzo, 2011).

4.2.1 Interacción planta-suelo-contaminante que influyen en la eficacia de la fitorremediación

La toxicidad de los EPT depende de varios factores, como: la concentración en el sitio, propiedades químicas del elemento tóxico, la biodisponibilidad y la etapa de desarrollo de las plantas. Cuando la planta se expone a los EPT, el mecanismo de tolerancia basal de la planta se activa y les permite hacer frente al estrés (Gill et al., 2021). Sin embargo, en altas concentraciones los elementos suprimen el mecanismo de defensa de las plantas y causan efectos adversos en los procesos fisiológicos, como la fotosíntesis, la transpiración y el metabolismo energético, limitando así el crecimiento y el desarrollo de la planta. (Kumar et al., 2018; Gautam et al., 2020; Ahmad et al., 2020; Usman et al., 2020).

Cada EPT tiene un comportamiento diferente en la acción de la planta, pero todos los elementos exhiben efectos tóxicos. La planta se enfrenta a un retraso en el crecimiento, necrosis, clorosis y la tasa de germinación disminuye, todos estos cambios se deben a alteraciones estructurales y moleculares en las células vegetales por los EPT (Villiers et al., 2011; Khan et al., 2021)

Los EPT ingresan principalmente a los sistemas de plantas desde el suelo o el agua a través del transporte pasivo o activo. Después de la absorción que es facilitada por los

canales iónicos incrustados en la membrana, los iones elementales se translocan a las partes aéreas de las plantas (es decir, el tallo y las hojas) a través de los canales de la xilema. En general, las plantas capaces de acumular EPT en sus tejidos bioconcentran principalmente los elementos en la raíz, seguidos del tallo, las hojas y, en algunas especies, incluso las semillas (Shamim, 2018; Dinu et al., 2020).

Asimismo, las características del suelo afectan significativamente la técnica de la fitorremediación, cuando los suelos son finos, con un pH adecuado y un alto contenido de materia orgánica favorecen el crecimiento de la planta de interés y la disponibilidad de nutrientes, además que el contaminante, su solubilidad, biodisponibilidad y toxicidad afectan directamente en la eficacia de la fitorremediación (Ecoembes, 2024).

5. MECANISMOS DE FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR EPT

5.1 Fitoestabilización

La técnica de fitoestabilización consiste en la inmovilización y biodisponibilidad de los contaminantes, es decir la planta acumula el contaminante alrededor de las raíces, las raíces secundarias tienen la capacidad de producir compuestos químicos que pueden absorber y/o formar complejos químicos con los contaminantes, donde se inmovilizan en la interfase suelo-raíces. Las plantas que son consideradas fitoestabilizadoras son capaces de tolerar altos niveles de sustancias tóxicas e inmovilizarlas. (Goicochea-Trelles, P. A., & Garcia-Lopez, Y. J., 2022). Esta técnica se produce a través de la microbiología y la química de la zona radicular, y/o la alteración del entorno del suelo o la química de los contaminantes (EPA, 2000)

5.2 Fitoextracción

Se refiere a la absorción y concentración de elementos tóxicos o compuestos orgánicos (Carpena, R. O., & Pilar Bernal, M., 2007) en el suelo a través de las raíces de las plantas en las partes aéreas de las plantas, esta técnica es utilizada principalmente en el tratamiento de suelos contaminados (Zhang, X., et al., 2010). La fitoextracción utiliza las plantas para absorber, concentrar y precipitar EPT de suelos contaminados en la biomasa aérea (brotes, hojas, etc.) (Wuana, R. A., Okieimen, F. E., and Imborvungu, J. A., 2010). Se basa en procesos fisiológicos que permiten que la planta funcione como un succionador, absorbiendo metales que se encuentran en el suelo a través de las raíces de la planta mediante la fotosíntesis, para posteriormente almacenarlas en sus tejidos aéreos. Entre las plantas con mayor potencial para este tipo de prácticas se encuentran las especies metalófitas, que soportan elevados niveles de metales y sobreviven de forma endémica en estos entornos (Cordero J, 2015).

5.3 Fitovolatilización

Este proceso consiste en utilizar plantas para absorber contaminantes del suelo, transformándolos en compuestos volátiles y liberándolos a la atmósfera mediante la transpiración (Parul Sharma, & Sonali Pandey, 2014), evaporación o volatilización, es decir son liberados en forma gaseosa (Goicochea-Trelles, P. A., & Garcia-Lopez, Y. J., 2022). La fitovolatilización también se refiere a la difusión de contaminantes desde los tallos u otras partes de la planta, a través de los cuales el contaminante viaja antes de llegar a las hojas. Esta técnica puede aplicarse a contaminantes presentes en el suelo, sedimentos o agua (Parul Sharma, & Sonali Pandey, 2014). Únicamente ciertas plantas tienen la capacidad de volatilizar determinados contaminantes como el mercurio y el selenio. Un ejemplo de ello es que en colaboración con las plantas pueden convertir el selenio en seleniuro de dimetilo, que es una forma del selenio menos tóxica y volátil (Goicochea-Trelles, P. A., & Garcia-Lopez, Y. J., 2022).

5.4 Fitodegradación

Se basa en el uso de plantas para degradar o transformar en sustancias menos tóxicas diversos contaminantes orgánicos. Este proceso sucede en la rizosfera, es decir la zona del suelo que rodea estrechamente las raíces de las plantas, en esta área ocurren reacciones enzimáticas con ayuda de los microorganismos y (Núñez R., et al., 2004) otros compuestos producidos por los tejidos de la planta distintos de las raíces (Clu-in, s/f), que ayudan a degradar o transformar parcial o completamente estos contaminantes. Así, los contaminantes son absorbidos por las plantas, almacenados en sus vacuolas o fijados a estructuras celulares insolubles, como la lignina (Núñez R., et al., 2004). En el mecanismo de la fitodegradación los contaminantes se descomponen después de que la planta los haya absorbido (Parul Sharma, & Sonali Pandey, 2014).

5.5 Rizofiltración

Se refiere al uso de las raíces de las plantas para absorber y adsorber contaminantes del agua y otros efluentes acuosos (Carpena, R. O., & Pilar Bernal, M., 2007), generalmente para la eliminación de metales u otros compuestos inorgánicos (Parul Sharma, & Sonali Pandey, 2014), debido a procesos bióticos y abióticos, se puede producir absorción, concentración y translocación dependiendo del tipo de contaminante. Los exudados de las raíces de las plantas pueden causar la precipitación de algunos metales. Inicialmente, la rizofiltración permite la contención de contaminantes, inmovilizándolos o acumulándolos en o dentro de la planta, para luego ser eliminados al retirar físicamente la planta (EPA, 2000).

5.6 Rizodegradación

Hace referencia a la descomposición de compuestos orgánicos por una actividad mayor de los microorganismos en la rizosfera de la planta (Clu-in, s/f), la rizodegradación también conocida como degradación asistida por plantas o biorremediación asistida por plantas. En este proceso las plantas elaboran compuestos y son vertidos por sus raíces los cuales se les conoce como exudados en donde se encuentran azúcares,

aminoácidos, ácidos orgánicos, ácidos grasos, esteroides, factores de crecimiento, nucleótidos, flavonoides, enzimas y otras sustancias. Los exudados tienen la capacidad de estimular poblaciones microbianas y la actividad en la rizosfera de la planta, lo que aumenta la efectividad de la biodegradación de contaminantes orgánicos en el suelo, cabe resaltar que el co-metabolismo de los contaminantes en la rizosfera puede deberse a la descomposición de los exudados (EPA, 2000).

6. IMPORTANCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN

La problemática ambiental que vivimos requiere de una atención impostergable, por lo que en los últimos años se han desarrollado investigaciones para estudiar la capacidad de diversos organismos para acumular, atenuar o degradar diversos contaminantes (Cota-Ruiz, K., et al., 2019), el alto costo de diversas tecnologías de limpieza llevo a buscar nuevas estrategias de limpieza que sean de bajo costo, bajo impacto, visualmente benignas y ambientalmente amigables (Parul Sharma, & Sonali Pandey, 2014), por lo que el uso de sistemas biológicos es una alternativa viable para la remediación de los sitios contaminados, diversos estudios han demostrado que las plantas tienen la capacidad de biotransformar nanomateriales tóxicos que se incorporan a los suelos (Cota-Ruiz, K., et al. 2019), ha esta tecnología se le denomina fitorremediación, la cual representa una tecnología alternativa para la restauración de ambientes y efluentes contaminados, ya que es una tecnología de bajo costo, dado que no requiere de una infraestructura sofisticada, además de ser sustentable, compatible con el ambiente y visualmente más agradable que las tecnologías convencionales (Núñez R., et al., 2004).

La aplicación de enfoques biotecnológicos ecológicos, herramientas fitotecnológicas y métodos microbianos para la restauración del medio ambiente contaminado toma una gran importancia, (Mani D. & Kumar C., 2014). La capacidad de las plantas para absorber, adsorber, metabolizar, acumular, estabilizar o volatilizar contaminantes orgánicos e inorgánicos, junto con las complejas interacciones que mantienen en la rizósfera y el desarrollo de plantas genéticamente modificadas, otorgan a esta tecnología ventajas significativas frente a los métodos convencionales de remediación. Sin embargo, es necesario profundizar en el estudio de las interacciones entre las plantas y los microorganismos de la rizósfera, en los metabolitos que participan en la quelación de EPT dentro de las plantas y en el papel de ciertas enzimas en la fitorremediación. A medida que este conocimiento aumente, será posible aplicar esta tecnología de manera más eficiente y a mayor escala (Delgadillo-López, A. E., 2011)

7. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FITORREMEDIACIÓN

7.1 Factores que afectan la eficacia de la fitorremediación

Cada lugar que requiere de un tratamiento para su remediación es único, sin embargo, para ello es necesario analizar los factores que tienen una influencia en la eficacia de la

técnica para lograr una mayor efectividad en el tratamiento, por lo que a continuación se describen las consideraciones que se deben tomar en cuenta.

7.1.1 Contaminante

Existen diversos tipos de contaminantes tóxicos para los organismos, incluyendo el ser humano, entre ellos destacan los siguientes: metales, metaloides, no metales, radionúclidos, hidrocarburos de petróleo, solventes clorados, pesticidas, conservantes, surfactantes y otros tipos de contaminantes (Chicaiza-Ortiz, C. D., et al., 2023).

Los compuestos químicos se dividen en orgánicos e inorgánicos. Los compuestos orgánicos están formados principalmente por átomos de carbono y pueden tener un origen natural o antropogénico. En contraste, los compuestos inorgánicos, por lo general, no contienen carbono y abarcan elementos como los metales. Por lo que se deben tomar en cuenta alguna de las características fisicoquímicas del contaminante como: estructura del contaminante, concentración, toxicidad, solubilidad, volatilización, densidad y biodegradabilidad (Volke T. & Velasco J. A., 2002), estas características pueden afectar negativamente el movimiento del agua, el movimiento del aire o la absorción de nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (EPA, 2000).

7.1.2 Especie Vegetal

La morfología y la profundidad de las raíces son esenciales para la fitorremediación, dado que se necesita un contacto directo entre la raíz y el contaminante, la profundidad de las raíces influye directamente en la profundidad del suelo que puede ser tratada. La profundidad de las raíces es influenciada por factores como la fertilidad del suelo, la densidad de cultivo, la concentración de contaminantes y otros elementos (Chicaiza-Ortiz, C. D., et al., 2023).

Una gran masa de raíces y biomasa resulta beneficiosa para la fitorremediación, ya que permite una mayor acumulación de metales, transpiración, absorción y metabolismo de contaminantes, además de la producción de exudados y enzimas. Sin embargo, ciertas características de las plantas, como los exudados radiculares, pueden ser aún más cruciales para la eficacia de la fitorremediación que la propia biomasa. La selección de la planta y su variedad debe adaptarse a las condiciones climáticas y edáficas del lugar, así como a los requerimientos de la fitorremediación. Las plantas que puedan adaptarse y competir en condiciones cambiantes tienen una ventaja, y según el clima y el tipo de suelo, puede ser necesario que la planta sea resistente o tolerante a enfermedades. (Chicaiza-Ortiz, C. D., et al., 2023).

7.1.3 Suelo

El suelo es un recurso natural que desempeña distintas funciones en la superficie de la Tierra, proporcionando un sistema mecánico, así como nutrientes para el crecimiento de plantas y microorganismos, por otro lado, para poder utilizar una tecnología de remediación es necesario considerar las propiedades del suelo como: el tamaño de

partícula, heterogeneidad, densidad aparente, permeabilidad, pH, humedad, materia orgánica (Volke T. & Velasco J. A., 2002).

Las propiedades del suelo son igualmente importantes al aplicar esta técnica. Suelos finos, con un pH adecuado y alto contenido de materia orgánica, facilitan el crecimiento de las plantas y la disponibilidad de nutrientes. La efectividad de la fitorremediación también depende del tipo de contaminante, su solubilidad, biodisponibilidad y toxicidad (Ecoembes, 2024).

7.1.4 Microorganismos

Los microorganismos pueden potenciar la fitorremediación debido a sus capacidades para solubilizar nutrientes, que luego son aprovechados por las plantas, y a sus sistemas enzimáticos, que ayudan a controlar las especies reactivas de oxígeno que generan estrés en las plantas. Además, cuentan con enzimas que participan en la eliminación y degradación de contaminantes. El éxito de la fitorremediación asistida por microorganismos depende de la combinación de especies de plantas y microorganismos seleccionados (Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A., & Ferrera-Cerrato, R., 2021).

La intervención de microorganismos es fundamental en la fitorremediación, ya que facilita el ciclo de nutrientes, incrementa la producción de biomasa vegetal y reduce la toxicidad de los contaminantes persistentes para las plantas, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del proceso (Perea-Vélez Y.S., Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A., 2017)

7.1.5 Clima

Factores como la temperatura, la precipitación y la radiación solar influyen en la tasa de crecimiento de las plantas y en los procesos biológicos relacionados. Asimismo, la comunidad de microorganismos en la rizosfera, es decir, alrededor de las raíces, desempeña un papel importante en la degradación de contaminantes orgánicos (Ecoembes, 2024).

La temperatura es un factor clave que impacta los procesos fisiológicos de las plantas, como la respiración, la fotosíntesis, y el metabolismo del nitrógeno y el oxidativo. Estos procesos son esenciales para el crecimiento, la producción de energía y las respuestas al estrés, influyendo directamente en la capacidad de la planta para tolerar y remediar contaminantes ambientales (Pedrosa M. P., 2024).

7.2 Mecanismos de las Plantas para acumular EPT

La tolerancia de las plantas a los EPT se regula a través de una red interconectada de mecanismos moleculares y fisiológicos. Para utilizar plantas en la fitorremediación, es fundamental comprender en detalle estos mecanismos interrelacionados. Las distintas especies vegetales presentan diversos mecanismos para resistir los EPT, y en ocasiones, una misma planta puede emplear múltiples estrategias de tolerancia. Las plantas desarrollan mecanismos adaptativos e integrales que les permiten soportar altas concentraciones de EPT. Entre estos mecanismos se incluyen el secuestro de metales

mediante ligandos, su inmovilización, quelación, biosíntesis de moléculas de señalización, exclusión a través de membranas plasmáticas, entre otros. La identificación de la acumulación de EPT y la tolerancia en las plantas se lleva a cabo mediante técnicas moleculares, físicas y bioquímicas (Yaashikaa P. R., et al., 2022).

Los EPT presentes en el suelo interactúan inicialmente con la superficie de la raíz y posteriormente con la membrana plasmática. Las plantas cuentan con diversos mecanismos celulares y moleculares que les permiten tolerar la acumulación de iones metálicos y mitigar el estrés asociado a estos metales (Yaashikaa P. R., et al., 2022).

Las plantas han desarrollado diversos mecanismos de tolerancia para resistir y sobrevivir a la exposición a EPT, utilizando estrategias como la exclusión, mineralización, reducción, solubilización, quelación, redistribución y acumulación. La exclusión consiste en un sistema de expulsión o liberación de metales desde el interior hacia el exterior de la planta, con el objetivo de evitar o reducir su acumulación en los tejidos. La mineralización disminuye la biodisponibilidad de los metales, impidiendo su absorción. Por otro lado, la solubilización implica transformar un metal insoluble en una forma soluble, es decir, convertirlo de una forma no asimilable a una asimilable. La reducción transforma especies químicas altamente tóxicas en formas menos tóxicas (por ejemplo, cromo VI a cromo III), que luego pueden ser asimiladas y metabolizadas por la planta. Una vez que los metales están dentro del organismo, se someten a biotransformaciones al ser "secuestrados" por un ligante que puede ser preexistente o sintetizado, un proceso conocido como quelación. La quelación (del griego chelé, que significa "pinza" o "garfio") se refiere a la formación de un complejo entre el metal y un ligante, donde este último, una molécula orgánica, posee múltiples sitios de unión que permiten sujetar firmemente un átomo central (el metal), formando un complejo muy estable que puede ser transportado y almacenado en las vacuolas de la planta. De esta manera, el metal queda "secuestrado" y se vuelve inactivo, evitando su toxicidad. En general, los mecanismos de tolerancia varían entre las especies vegetales y están determinados por el tipo de metal presente (Núñez R., et al., 2004).

7.3 Plantas Ornamentales en la Fitorremediación

Las plantas poseen características fisiológicas que les permiten absorber/adsorber nutrientes mediante procesos físicos, químicos y biológicos. En este concepto, se ha demostrado que algunas plantas ornamentales tienen estas características de depuración de contaminantes. Estas especies vegetales pueden utilizarse como materia prima en la elaboración de artesanías, arreglos florales y el cultivo de plántulas en macetas que pueden comercializarse en pequeñas cantidades (Zitácuaro-Contreras I. et al., 2022)

Muchas plantas ornamentales han sido evaluadas por su potencial en fitorremediación. Como muchas plantas ornamentales no son comestibles, se reduce el riesgo de que los contaminantes ingresen a la cadena alimentaria. Las plantas ornamentales tienen la ventaja adicional de mejorar la estética del medio ambiente, además de limpiarlo y

generar ingresos adicionales, incluidas oportunidades de empleo adicionales (Nakbanpote W, et al. 2024).

La adopción de fitorremediación ornamental también puede ayudar a obtener créditos en forma de captura y almacenamiento de carbono, mecanismos de desarrollo limpio y promover la estética/turismo/recreación durante el período de tratamiento (Deepika, Haritash, A.K., 2023).

8. ESPECIES VEGETALES DE ESTUDIO

8.1 Maguey de montaña (*Agave Salmiana*)

8.1.1 Origen

Agave salmiana, de acuerdo con su taxonomía perteneciente al reino: Plantae, división: Tracheophyta, clase: Magnoliopsida, orden: Asparagales y familia: *Asparagaceae* (CONABIO, 2021), conocido comúnmente como maguey de montaña, manso o pulquero, es una planta suculenta originaria de México, se produce principalmente en los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y Puebla (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2018)

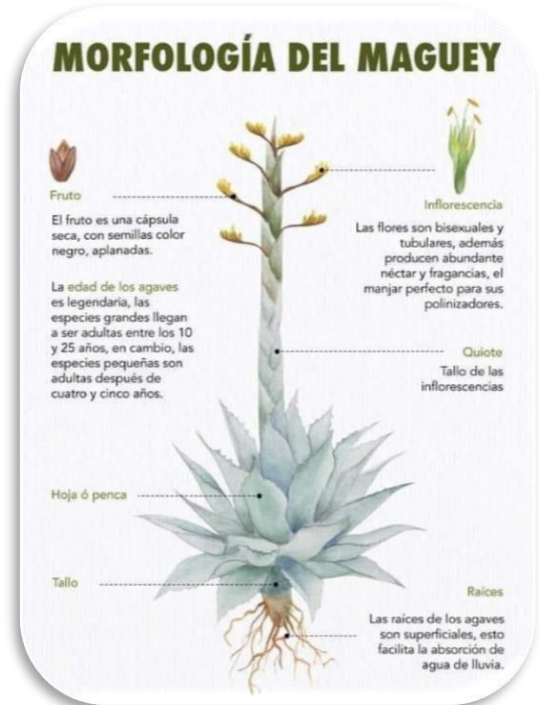


Imagen 1. Morfología del Agave (FUENTE: García Mendoza, Abisai J, 2007)

8.1.2 Características

Agave salmiana es una planta perenne de porte arbustivo que desarrolla una roseta basal de hasta 2 metros de altura y diámetro. Sus hojas, de color verde oscuro y forma acanalada similar a un barco, permanecen erguidas incluso en la madurez, cuando desarrollan vellosidades en el ápice. Estas hojas miden entre 1 y 2 metros de largo, y entre 20 y 30 cm de ancho. La inflorescencia es de gran tamaño, con forma piramidal y puede alcanzar los 8 metros de altura. El tallo floral presenta brácteas carnosas y numerosas ramas en la parte superior, asemejándose a un abeto. En estas ramas se agrupan densamente flores no bulbíferas. Las flores, de textura carnosa y forma de embudo, miden entre 8 y 10 cm. Son erectas, con una base verdosa (el ovario) y sépalos amarillos. Los estambres maduran antes que los carpelos y desaparecen poco



Imagen 2. *Agave Salmiana*. (FUENTE: EDU.LAT, 2019)

después de la antesis. El perianto se compone de seis pétalos fusionados en su base (EDU.LAT, 2019).

8.1.3 Usos

El maguey pulquero, también conocido como maguey manso, es la especie de maguey que mayor presencia tiene en el altiplano mexicano y es cultivada para la producción de aguamiel y pulque. Además, se pueden aprovechar todas sus partes, incluso sus plagas. Los productos con mayor valor agregado que se extraen del maguey pulquero son el aguamiel, el pulque, gusano rojo, y las pencas que se usan para producir barbacoa (EDU.LAT, 2019). Asimismo, se pueden extraer fibras para la elaboración de textiles (ropa, redes, papel), así como sogas para delimitar terrenos y terrazas agrícolas (Ojeda Barrios D. L. y Morales Maldonado E. R., 2024). Por otro lado, la fibra del maguey es utilizada para la elaboración de artesanías (Vázquez-Alonso et al., 2014) como bolsas, macetas y cuadros; con las semillas secas se elaboran adornos corporales o juguetes; con las espinas se fabrican aretes; y de la raspa, juguetes con representaciones del maguey como trompos, baleros y bastones (Ojeda Barrios D. L. y Morales Maldonado E. R., 2024).

Desde el punto de vista agroecológico, la planta de maguey contribuye a minimizar la erosión eólica e hídrica al mantener la humedad mediante la retención de suelo y la protección de los cultivos (Ojeda Barrios D. L. y Morales Maldonado E. R., 2024), los productores rurales utilizan las plantas del maguey pulquero para la conservación del suelo agrícola, ya que ayuda a mantener los nutrientes del suelo. Además, esta planta capta el agua de lluvia, debido a su característica arrosetada, lo que permite que sea aprovechada por los cultivos adyacentes. Por su lado, *Agave salmiana* es usada para conformar barreras vivas y así dividir diferentes parcelas de cultivo; esto además trae como consecuencia la protección de cultivos, pues estas barreras funcionan como cortavientos. Por último y más importante, las plantas del maguey pulquero ayudan en la conservación de la biodiversidad, ya que es hospedador de animales e insectos, que además ayudan a los cultivos (EDU.LAT, 2019).

8.1.4 *Agave Salmiana* en la fitorremediación

El *Agave salmiana*, una planta xerófila nativa de México ha demostrado tener un gran potencial en la fitorremediación. Sus características de adaptación a suelos pobres y condiciones áridas, junto con su capacidad para acumular y tolerar EPT, la hacen una opción viable para proyectos de remediación ambiental.

En un estudio donde se realizó el análisis in vitro de la acumulación de EPT en plantas de la familia Asparagaceae tolerantes a la baja disponibilidad de agua, donde se reportó que *A. salmiana* formó raíces en todos los tratamientos con metales y de acuerdo con los factores de translocación y bioacumulación las especies analizadas se clasificaron como fitoestabilizadoras, exclusoras, bioacumuladoras e indicadoras. Además *A. salmiana* presentó mecanismos de fitoestabilización y exclusión. En conclusión, el

género *Agave* mostró ser tolerante a los metales, por lo que se puede usar para fitoestabilizar y remediar suelos contaminados (Perales Aguilar L., et al., 2020).

8.2 Cactus Lirio de Pascua (*Echinopsis Oxigona*)

8.2.1 Origen

De acuerdo con la taxonomía de *Echinopsis Oxigona* pertenece al reino: Plantae, división: Magnoliophyta, clase: Magnoliopsida, orden: Caryophyllales, familia: Cactaceae. (Plants of the World, s/f), comúnmente conocido como cactus lirio de pascua o erizo de mar es originario de América del Sur, específicamente de los países: Uruguay, Argentina, Bolivia, Brasil y Paraguay (Verde suculenta, 2021).

8.2.2 Características

Esta especie, anteriormente conocida como *Echinopsis paraguayensis*, posee una amplia distribución geográfica que incluye territorios de Argentina, Bolivia, Brasil y Uruguay. Generalmente, crece en pequeños grupos. En cuanto a su morfología, presenta un cuerpo globoso de color verde oscuro y aspecto robusto. Posee entre 8 y 14 costillas redondeadas, en ocasiones con leves protuberancias. Sus aréolas son blancas y están ligeramente hundidas, con espinas de punta oscura: entre 1 y 5 espinas centrales —que a veces pueden faltar—, muy agudas y agrupadas densamente, y de 3 a 15 espinas radiales en forma de aguja. Los botones florales son notablemente pubescentes. Tiene una floración prolongada que ocurre durante la noche, con flores grandes de tonos blanco, rosado o rojo pálido, que alcanzan hasta 25 cm de longitud, con pétalos notablemente puntiagudos y un ligero aroma. Su androceo presenta una estructura particular: de forma oblonga, dispuesta horizontal y parcialmente expuesta fuera de la corola. El fruto es verde y mide cerca de 4 cm. Su número cromosómico es $2n=22$. Se desarrolla en zonas rocosas con pendientes pronunciadas y se reproduce fácilmente por medio de hijuelos (Pin A.B. & Simon J, 2004).



Imagen 3. *Echinopsis Oxigona*
A. Vista frontal, B. Flor.
(FUENTE: Pin A.B. & Simon J, 2004)

8.2.3 Usos

Echinopsis oxigona es popular como planta ornamental en jardines y en interiores debido a su capacidad para producir grandes y llamativas flores de colores que van desde el blanco hasta el rosado.

Es apreciada por su bajo mantenimiento y su capacidad para adaptarse a diversas condiciones climáticas, lo que la hace ideal para jardines xerófitos y paisajismo sostenible (Green J, 2023; Morgan H, 2021).

8.3 *Echinopsis Oxigona* en la Fitorremediación

Hasta el momento no existen estudios donde se ha estudiado el potencial de *Echinopsis oxigona* en la fitorremediación, sin en cambio los cactus desempeñan un papel crucial en la restauración de suelos degradados debido a su capacidad para resistir condiciones extremas. Estas plantas pueden sobrevivir en suelos pobres en nutrientes y con poca agua, lo que las convierte en candidatas ideales para la recuperación de áreas degradadas. Además, los cactus tienen raíces largas y profundas que ayudan a fijar el suelo, evitando la erosión y mejorando su estructura. La investigación científica ha demostrado los efectos positivos de los cactus en el medio ambiente. Estudios han mostrado que los cactus pueden mejorar la calidad del suelo al incrementar su contenido de materia orgánica y nutrientes. También se ha comprobado que los cactus promueven la biodiversidad al proporcionar refugio y alimento para insectos, aves y otros animales. Estos hallazgos respaldan la importancia de incluir cactus en programas de restauración de suelos y conservación del medio ambiente (Esperanza, 2023).

9. CONTRIBUCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS

9.1 Fitorremediación asistida con Microorganismos

La fitorremediación con microorganismos es una forma de remediación de suelos y aguas contaminadas con compuestos orgánicos. Esta técnica se realiza mediante el uso de microorganismos (bacterias, hongos y algas) que son capaces de biodegradar los productos químicos dañinos. Estos microorganismos se desarrollan en el medio ambiente y son capaces de absorber los contaminantes de manera natural, ha esta estrategia se le denomina fitorremediación asistida por microbios (Rayu, S., Karpouzias, D.G. & Singh, B.K., 2012).

Los microorganismos participan en diversos procesos que benefician a la planta y resultan en ventajas para lograr su establecimiento y desarrollo en sitios contaminados con EPT (González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R., 2017). La fitorremediación asistida se realiza para mejorar las tecnologías propias de la fitorremediación, que en condiciones de invernadero y estudios *in situ* podría tener como consecuencia la bioaumentación, debida a los exudados radicales y a los microorganismos introducidos en el suelo, estos cambios podrían promover el incremento de los microorganismos nativos con capacidades de remover y degradar los contaminantes (Mendarte-Alquisira C., et al., 2021)).

9.1.1 Papel de los microorganismos en la degradación y detoxificación de contaminantes presentes en los jales mineros

Las interacciones entre las bacterias y los EPT se producen por una serie de eventos que se inician fuera del entorno celular y finalizan intracelularmente. Estos eventos pueden ocurrir en secuencia o no, y las características de cada uno de ellos depende del microorganismo considerado, el compartimiento en el cual ocurre, y el tipo y especie química del metal. Estas interacciones tienen una incidencia directa sobre los ecosistemas. En este sentido, las comunidades bacterianas son capaces de hacer disponibles los EPT para los organismos que conforman las diferentes tramas tróficas, favoreciendo los procesos de bioacumulación, biotransferencia y biomagnificación. Estos procesos toxicológicos traen como consecuencia importantes efectos sobre los organismos y modificaciones relevantes sobre el ambiente. Además, dado que las bacterias son capaces de acumular EPT, pueden ser consideradas como indicadores biológicos de la contaminación. También, su capacidad de bioabsorber y biotransformar los metales puede ser utilizada como una importante herramienta en el tratamiento biológico de desechos contaminados con estos elementos (Suárez P & Reyes R, 2002).

El uso de los microorganismos constituye una estrategia potencialmente viable. Hasta hace algunos años las investigaciones se habían limitado a la identificación de aquellos microorganismos capaces de aislar compuestos tóxicos. Hoy día las investigaciones están dirigidas a incrementar la tasa de degradación de compuestos tóxicos, mejoramiento genético de microorganismos para que se adapten a ambientes extremos y desarrollo de diferentes técnicas biocorrectivas alternativas para la recuperación de suelos degradados (Torres Rodríguez, D., 2003).

9.2 Fitorremediación asistida con Bacterias

La remediación microbiana, especialmente la remediación bacteriana, parece ser una estrategia prometedora para la biorremediación de EPT y se puede aplicar junto con la fitorremediación para mejorar el crecimiento general y el rendimiento de las plantas en suelos contaminados con EPT (Belapurkar P., Dubey S., Kelotra S., 2023).

El uso de bacterias en los procesos de fitorremediación provoca un proceso de simbiosis entre los microorganismos y las plantas, incluyendo las Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (BPCV). Estas bacterias provocan mecanismos en las plantas que les facilitan la regulación del crecimiento, incrementar y optimizar la disponibilidad y absorción de nutrientes. La creación de biopelículas es un método que las bacterias emplean para sobrevivir frente a las condiciones cambiantes del entorno en el que se desarrollan, proporcionando, entre otras cosas, resistencia a la desinfección, estrés ambiental y condiciones adversas en los microambientes creados (Castillo M., Yañez S., 2018).

En este sentido, los exudados de las raíces de las plantas actúan como fuente de nutrición y energía para los microorganismos del suelo, formando así un elaborado sistema de comunicación. Los microbios, incluidas las bacterias y los hongos,

desempeñan un papel importante en la promoción del crecimiento de las plantas, que se conocen como Microorganismos Promotores del Crecimiento de las Plantas (MPCP), que forman interacciones cohesivas que ayudan a tratar los entornos metalíferos. Estas interacciones sinérgicas promueven el crecimiento de las plantas a través de diferentes mecanismos como la solubilización de minerales (de N, P, etc.), la producción de fitohormonas (IAA, citoquinas, giberelinas, etc.), mediante la secreción de enzimas específicas (como la ACC desaminasa) y la producción de sideróforos. Los MPCP también promueven indirectamente el crecimiento de las plantas al inducir mecanismos de defensa contra diferentes patógenos de las plantas (Belapurkar P., Dubey S., Kelotra S., 2023).

Investigaciones realizadas sugieren que la inoculación de BPCV y la aplicación de enmiendas son una herramienta prometedora para crear sistemas de fitorremediación más eficientes, por lo que la identificación, aislamiento e inoculación de BPCP puede ser de utilidad para mejorar la revegetación de sitios contaminados con EPT; sin embargo, es crucial encontrar la combinación adecuada de BPCV-planta-enmienda a aplicar. También es importante crear herramientas que permitan el monitoreo de los cambios en la rizosfera, así como en la disponibilidad de EPT, para evaluar la eficiencia y duración del proceso de fitorremediación (Perea-Vélez Y.S., Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A., 2017).

9.3 Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (BPCV)

Las BPCV se refieren a las bacterias de vida libre en el suelo y a las que colonizan la rizosfera o el tejido de las plantas; estas bacterias, al ser usadas como inoculante biológico, tienen un efecto positivo y medible sobre las plantas. Este efecto puede ser directo, a través del incremento en la disponibilidad de nutrientes o a través de la síntesis de moléculas que influyen benéficamente en el desarrollo de la planta, o indirecto, mediante amensalismo o competencia con organismos potencialmente patógenos o mediante la prevención de estreses abióticos (Pardo S., Mazo D. y Rojas D., 2021). Estas bacterias estimulan el crecimiento de las plantas a través de mecanismos como la síntesis de sustancias reguladoras del crecimiento, fijación de nitrógeno y solubilización de nutrientes. (Loredo-Osti C., López-Reyes L., & Espinosa-Victoria D., 2004)

La existencia de microorganismos en prácticamente todos los lugares del entorno se debe a que soportan y se desarrollan bajo condiciones extremas de temperatura, radiación, salinidad, pH, y una capacidad limitada de retención de agua en el suelo, el aire, el agua y los desiertos. La rizosfera es un sistema crucial para el desarrollo de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos, algas y protozoos. Es evidente que estos microorganismos están vinculados con las plantas de diversas formas posibles (Castillo M., Yañez S., 2018).

Las BPCV pueden favorecer el desarrollo de las plantas de manera directa o indirecta. Indirectamente, actúan como agentes de control biológico frente a fitopatógenos mediante mecanismos como la producción de antibióticos, el agotamiento de hierro en la rizosfera, la resistencia sistémica inducida, la síntesis de enzimas líticas y la competencia

por sitios de unión en las raíces. Directamente, las BPCV fijan nitrógeno atmosférico, sintetizan sideróforos que proporcionan hierro a las plantas, producen fitohormonas como auxinas, citoquininas y giberelinas, y solubilizan minerales como el fósforo, facilitando su absorción (Glick B. R, 2010).

9.3.1 Función de las BPCV en suelos contaminados

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal en suelos contaminados tienen varias funciones. Suministran nutrientes a los cultivos, estimulan el crecimiento de las plantas mediante la producción de hormonas vegetales y controlan o inhiben la actividad de patógenos vegetales (Hayat R. et al., 2010). Además, sintetizan reguladores de crecimiento, solubilizadores de fosfatos y fijadores de nitrógeno atmosférico, y disminuyen el ataque de fitopatógenos mediante la competencia, el parasitismo, la lisis enzimática y la antibiosis (Corrales-Lozada M., et al., 2020)

Una bacteria puede afectar directamente el crecimiento y desarrollo de las plantas utilizando uno o más de estos mecanismos. Dado que muchas BPCV poseen varios de estos rasgos, una bacteria puede utilizar diferentes rasgos en varios momentos durante el ciclo de vida de la planta. (Glick B.R., 2010)

Las BPCV, especialmente las rizobacterias benefician el crecimiento y desarrollo de las plantas directa e indirectamente a través de varios mecanismos. La producción de metabolitos secundarios, es decir, sustancias para el crecimiento de las plantas, cambia la morfología de la raíz, lo que resulta en una mayor superficie radicular para la absorción de nutrientes, producción de sideróforos, antagonismo a los patógenos de la raíz transmitidos por el suelo, solubilización de fosfato y fijación de dinitrógeno. La superficie de la raíz para la absorción de nutrientes y la producción de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal puede ayudar a optimizar el ciclo de nutrientes en caso de estrés debido a condiciones climáticas o del suelo inadecuadas (Hayat R. et al., 2010).

10. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación, por sí misma, muestra una serie de ventajas y limitaciones en comparación con otras tecnologías convencionales, presentadas en la Tabla 4. Las fitotecnologías son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajo, y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo (Delgadillo-López A. E., 2011).

Tabla 4. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
Es una tecnología sustentable.	En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso relativamente lento.
Es eficiente para tratar diversos tipos de elementos <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> .	Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta.
Se realiza sin necesidad de transportar el sustrato contaminado, con lo que se disminuye la diseminación de contaminantes a través del aire o del agua.	El crecimiento de las plantas está limitado por concentraciones tóxicas de contaminantes, por lo tanto, es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes.
Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos, inorgánicos y metales.	En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente.
Es de una mayor aceptabilidad pública, debido a que es estéticamente agradable.	La introducción de especies no autóctonas puede afectar la biodiversidad.
Es de bajo costo, por lo que no requiere de equipos costosos ni de personal especializado; la energía potencial se puede utilizar para generar energía térmica.	Existen factores de restricción en la tasa de crecimiento de las plantas: clima, hidrología, propiedades del suelo, etc.
Es poco perjudicial y genera menor perturbación del lugar.	No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.
No hay producción de contaminantes secundarios.	Se requieren áreas relativamente grandes.
Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal.	La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.
En el caso de la fitorremediación <i>in situ</i> se realiza con un mínimo de perturbaciones ambientales.	En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.
Se puede emplear para tratar suelo, agua, aire y sedimentos.	
Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales)	
Es una técnica que actúa en conjunto con la revegetación y la biodegradación.	

FUENTE: Modificado de Delgadillo-López A. E., et al., 2011; Bernal Figueroa A. A., 2014; Chicaiza-Ortiz C. D., et al., 2023

11. MARCO LEGAL

11.1 Internacional

Revisión Global de Relaves

Los desechos mineros pueden tener impactos devastadores en las personas y el medio ambiente. Con el objetivo de evitar estos daños, se crea el denominado Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera que establece un marco para garantizar la gestión segura de los residuos mineros (UNEP, 2020).

Este estándar fue creado como resultado de la Revisión Global de Relaves (GTR, por sus siglas en inglés), un proceso independiente en 2019 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), los Principios para la Inversión Responsable (PRI) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés), tras el trágico colapso de una instalación de relaves en Brumadinho, Brasil, el 25 de enero de 2019 (UNEP, 2020).

La norma abarca todo el ciclo de vida de las instalaciones de relaves y establece requisitos más estrictos para garantizar resultados sólidos en los ámbitos social, ambiental y técnico. Además, es un hito importante hacia la ambición de que las instalaciones de relaves generen cero daños para las personas y el medio ambiente (UNEP, 2020).

Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación.

El Convenio es el acuerdo ambiental mundial más exhaustivo en materia de desechos peligrosos y otros desechos. Su objetivo es proteger la salud de las personas y el medioambiente frente a los efectos nocivos resultantes de la generación, el movimiento transfronterizo (entre fronteras) y la gestión de desechos peligrosos y otros desechos (UE, 2018). El Convenio de Basilea busca minimizar la generación de desechos peligrosos y su traslado entre fronteras, incluyendo desechos mineros peligrosos (metales pesados o compuestos tóxicos), garantizando su gestión de manera ambientalmente responsable. Para lograrlo, fomenta la colaboración internacional y establece mecanismos de coordinación y supervisión (SEMARNAT, 2015).

Unión Europea (UE)

La UE ha introducido medidas para prevenir o reducir al mínimo cualquier efecto negativo sobre el medio ambiente y la salud derivado de la gestión de los residuos de las industrias extractivas, mediante la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo el 15 de marzo 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas. La Directiva establece medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir en la medida de lo posible los efectos adversos sobre el medio ambiente, en particular sobre las aguas, el aire, el suelo, la fauna, la flora y el paisaje, y los riesgos para la salud humana derivados de la gestión de los residuos de las industrias extractivas. Así también tiene una aplicación

en la gestión de los residuos de extracción, es decir, los residuos resultantes de la prospección, de la extracción, del tratamiento y del almacenamiento de recursos minerales, así como de la explotación de canteras, en lo sucesivo denominados «residuos de extracción» (DIRECTIVA 2006/21/CE).

El marco legal de la biorremediación en conjunto con la fitorremediación no se encuentra formalizado en tratados, sin embargo, se encuentra integrado en la implementación de estrategias para la protección del medio ambiente, gestión de los residuos y la descontaminación del suelo y el agua. Esto combina protección del medio ambiente con el uso de recursos naturales y uso seguro de tecnologías biológicas. A continuación, se presentan un marco general sobre la aplicación de estas estrategias:

La FAO es el organismo principal de las Naciones Unidas que lidia con los suelos. En su larga historia se han producido varias directrices y manuales acerca de todos los aspectos sobre suelos, enfatiza el uso de procesos biológicos para recuperar suelos afectados por EPT, pesticidas y otros contaminantes. La FAO contribuye con apoyo a los países miembros en todo que esté relacionado con el suelo en el campo mediante la ejecución de proyectos desde su Sede y Oficinas Regionales (FAO, 2024).

De acuerdo con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, mediante el objetivo 12, PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLE, promueve prácticas sostenibles del manejo de residuos y descontaminación, con el fin de reducir la liberación de estos desechos a la atmósfera, el suelo y el agua con el fin de minimizar los daños al medio ambiente y la salud humana. Asimismo, se destaca el objetivo 15, VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES, promoviendo la restauración de ecosistemas degradados, donde la biorremediación juega un papel importante.

11.2 Nacional

En México, las regulaciones clave que establecen los requisitos para la gestión de residuos peligrosos y no peligrosos generados por la industria minera son la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual establece disposiciones relacionadas con la gestión y manejo de residuos en general, donde establece que los generadores de estos residuos son responsable de identificar, clasificar y garantizar que los residuos generados tendrán un manejo adecuado para minimizar los riesgos a la salud y el medio ambiente, así también estos residuos pueden estar sujetos a planes de manejo de residuos. La LGPGIR se encarga de promover el tratamiento y la disposición final de los residuos mineros, además se hace mención que la federación tiene la facultad de expedir reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones jurídicas para regular el manejo integral de los residuos mineros, entre las principales normas que se encargan de regular aspectos específicos de los residuos mineros son las que se presentan a continuación:

- Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios

para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.

- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

La remediación de suelos en México es un tema regulado por varias disposiciones legales que establecen la obligación de realizar saneamientos en caso de contaminación.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el artículo 4, establece que "toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar", lo cual implica una responsabilidad por parte del Estado y de los particulares para mantener y restaurar un entorno ambiental saludable.

Por otra parte, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) mediante el artículo 15, promueve prevenir, restaurar los daños causados por obras o actividades al ambiente, mediante el uso de tecnologías limpias y sostenibles para la restauración ambiental.

Por último, la LGPGIR en el artículo 68, obliga a los responsables de sitios contaminados a realizar actividades de remediación.

11.3 Estatal

El Estado de Hidalgo se encuentra regulado por distintas leyes en favor de la protección de sus recursos naturales y en el control del manejo de los residuos sólidos generados por las distintas actividades humanas, de las cuales se hablan a continuación:

La Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente del Estado de Hidalgo en el capítulo V Aprovechamiento de Minerales o Sustancias no Reservadas a la Federación, en sus artículos se hace mención que debido a las actividades de exploración, explotación y aprovechamiento de los minerales se deben llevar a cabo medidas de protección al ambiente y restauración ecológica para evitar el daño del medio ambiente a fin de evitar daños al suelo, agua, la flora y la fauna silvestre, así como para salvaguardar la vida de las personas.

La Ley para la Protección del Medio Ambiente del Estado de Hidalgo regula actividades relacionadas con la protección ambiental en el estado, en ella se obliga a las empresas mineras a realizar estudios de impacto ambiental e implementar prácticas y aplicar tecnologías o ecotecnologías para evitar los impactos ambientales negativos debido a los procesos para llevar a cabo la actividad minera y por los residuos que esa industria genera.

Por otro lado, la Ley General de Equilibrio Ecológico del Estado de Hidalgo, dice que toda persona que produzca contaminación en el sitio tiene la responsabilidad de realizar acciones necesarias para remediar el sitio contaminado.

11.4 Municipal

El Plan de Desarrollo Municipal de Zimapán, Hidalgo, menciona que los jales mineros representan uno de los mayores problemas ambientales debido a su almacenamiento a cielo abierto durante décadas. Estas acumulaciones de residuos, provenientes de las actividades mineras, contaminan el aire, suelo y mantos acuíferos. Durante la temporada de lluvias, los lixiviados de los jales llegan a los acuíferos, mientras que, en épocas de viento, las partículas metálicas afectan la calidad del aire y la salud de los habitantes.

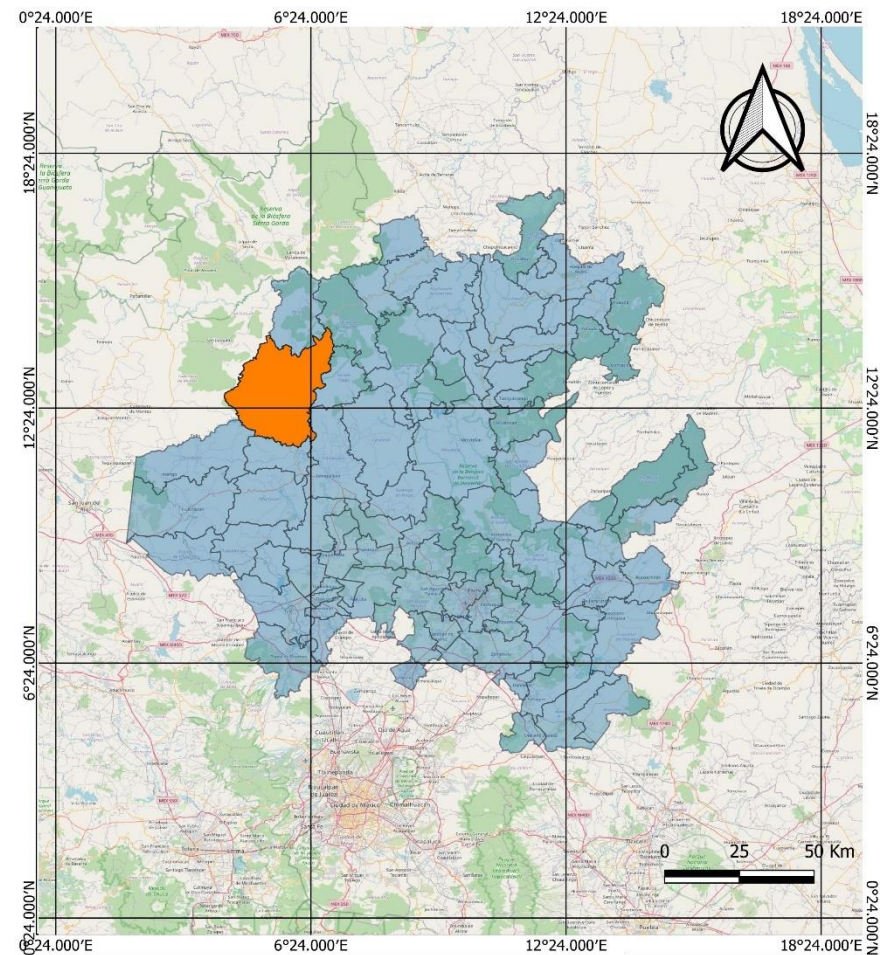
Aunque se han propuesto medidas como la compactación de jales o la siembra de plantas resistentes para contener su impacto, estas acciones no se han implementado de manera efectiva. Activistas locales han pedido al gobierno y a las empresas mineras asumir responsabilidades concretas para mitigar el problema, pero hasta ahora no existe un plan integral para abordar esta problemática.

12. ÁREA DE ESTUDIO

12.1 Zimapán, Hidalgo

12.1.1 Ubicación Geográfica

El Municipio de Zimapán se localiza a 144 Kilómetros de Pachuca, con una extensión territorial de 860.90 Km², lo representa el 4.19% de la superficie del estado de Hidalgo, sus coordenadas UTM son 460267.554 E, 2293097.527 N, a una altitud de 1,780 m. Limita al norte con los municipios de Pacula y Jacala; al sur con los de Tecozautla y Tasquillo; al este con los de Nicolás Flores e Ixmiquilpan y al oeste con el Estado de Querétaro. Sus principales comunidades son: Xajhá, Aguas Blancas, Xitha, el Cerrote, Morelos, Encarnación y Durango.



Ubicación Geográfica del Municipio de Zimapán

"Crecimiento y adaptación de las especies Maguey de Montaña (Agave Salmiana) y Cactus Lirio de Pascua (Echinopsis Oxigona) en presencia de BPCV para jales"

Elaboró: Pérez Sedano Madai

Sistema de Coordenadas de Referencia: WGS 84

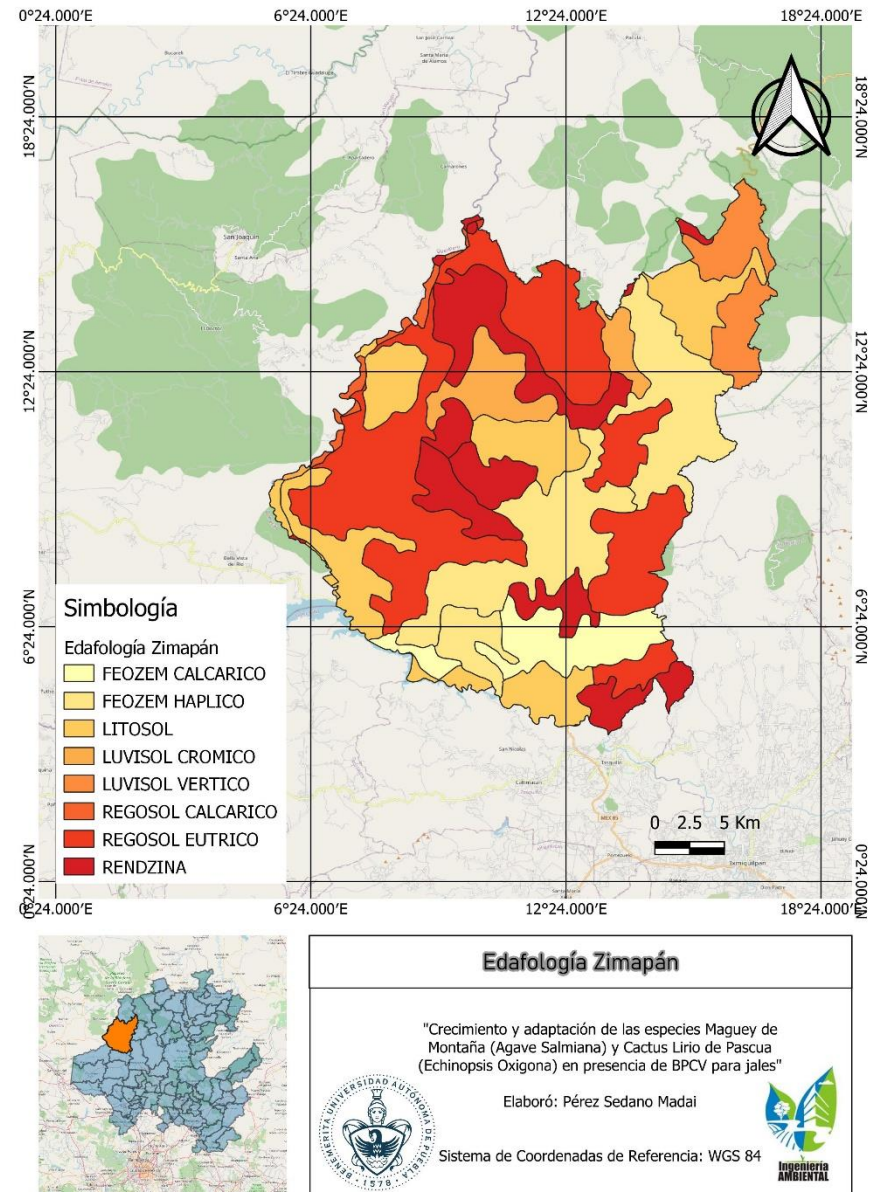


Simbología

- Municipio de Zimapán
- Estado de Hidalgo

12.1.2 Edafología

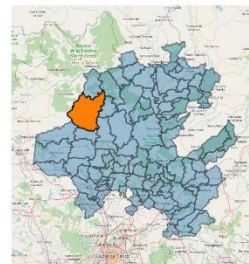
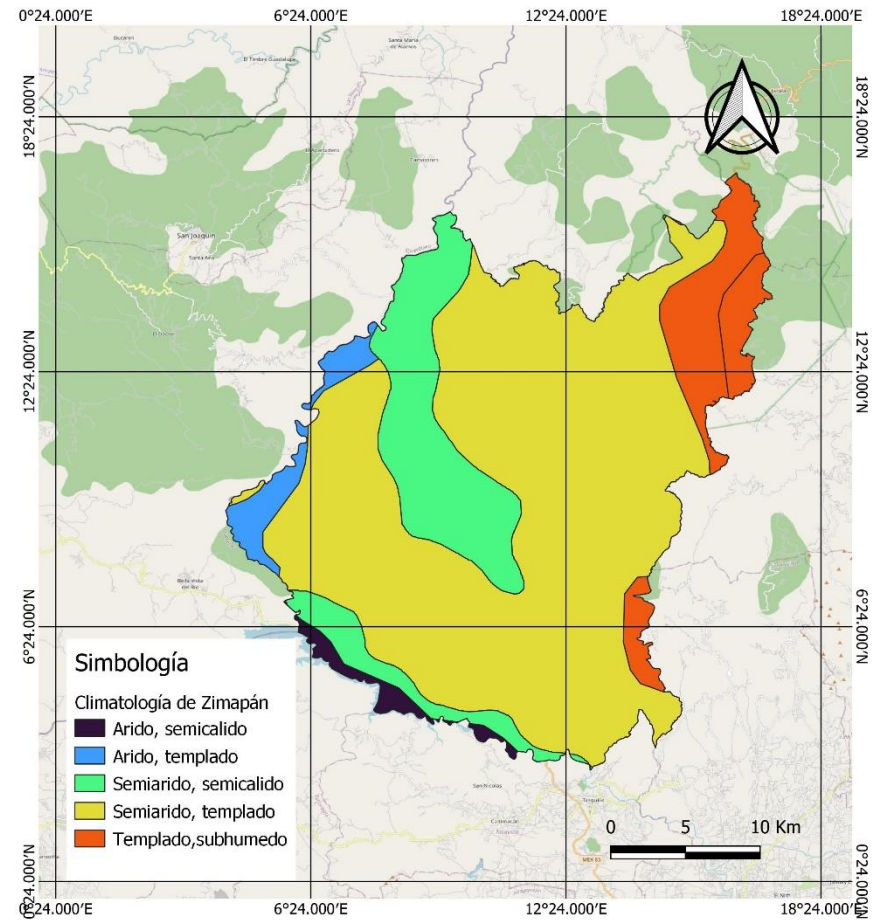
De acuerdo con el INEGI (2010), el municipio de Zimapán Hidalgo se caracteriza por los siguientes suelos dominantes: Leptosol (43.55%) que de acuerdo con la World Reference Base (WRB) también se conocen como Litosoles y Redzinas, son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo, Regosol (25.0%) son suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado, de colores claros y pobres en materia orgánica, son particularmente comunes en las regiones áridas, semiáridas (incluyendo los trópicos secos) y montañosas. Muchas veces se asocian con los Leptosoles y con afloramientos de roca o tepetate, Phaeozem (17.5%), estos son suelos oscuros y ricos en materia orgánica, por lo que son muy utilizados en agricultura de temporal; sin embargo, las sequías periódicas y la erosión eólica e hídrica son sus principales limitantes. Se utilizan intensamente para la producción de granos (soya, trigo y cebada, por ejemplo) y hortalizas, y como zonas de agostadero cuando están cubiertos por pastos, Luvisol (11.13%) son suelos que se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales. Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos húmedos con estacionalidad de lluvia y sequía, se encuentran dentro de los suelos más fértiles, por lo que su uso agrícola es muy elevado y cubre, por lo general, la producción de granos pequeños, forrajes y caña de azúcar y último el tipo de suelo Calcisol (1.59%) son suelos propios de las zonas áridas y semiáridas,



frecuentemente asociados a materiales parentales ricos en bases (depósitos aluviales, coluviales y eólicos). En los Calcisoles se desarrollan preferentemente los matorrales xerófilos con arbustos y pastos efimeros.

12.1.3 Climatología

El clima es semiseco templado (31.49%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (30.48%), semiseco semicálido (20.52%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (9.52%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (7.99%) (Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, 2011).



Climatología Zimapán

"Crecimiento y adaptación de las especies Magüey de Montaña (Agave Salmiana) y Cactus Lirio de Pascua (Echinopsis Oxigona) en presencia de BPCV para jales"

Elaboró: Pérez Sedano Madai

Sistema de Coordenadas de Referencia: WGS 84

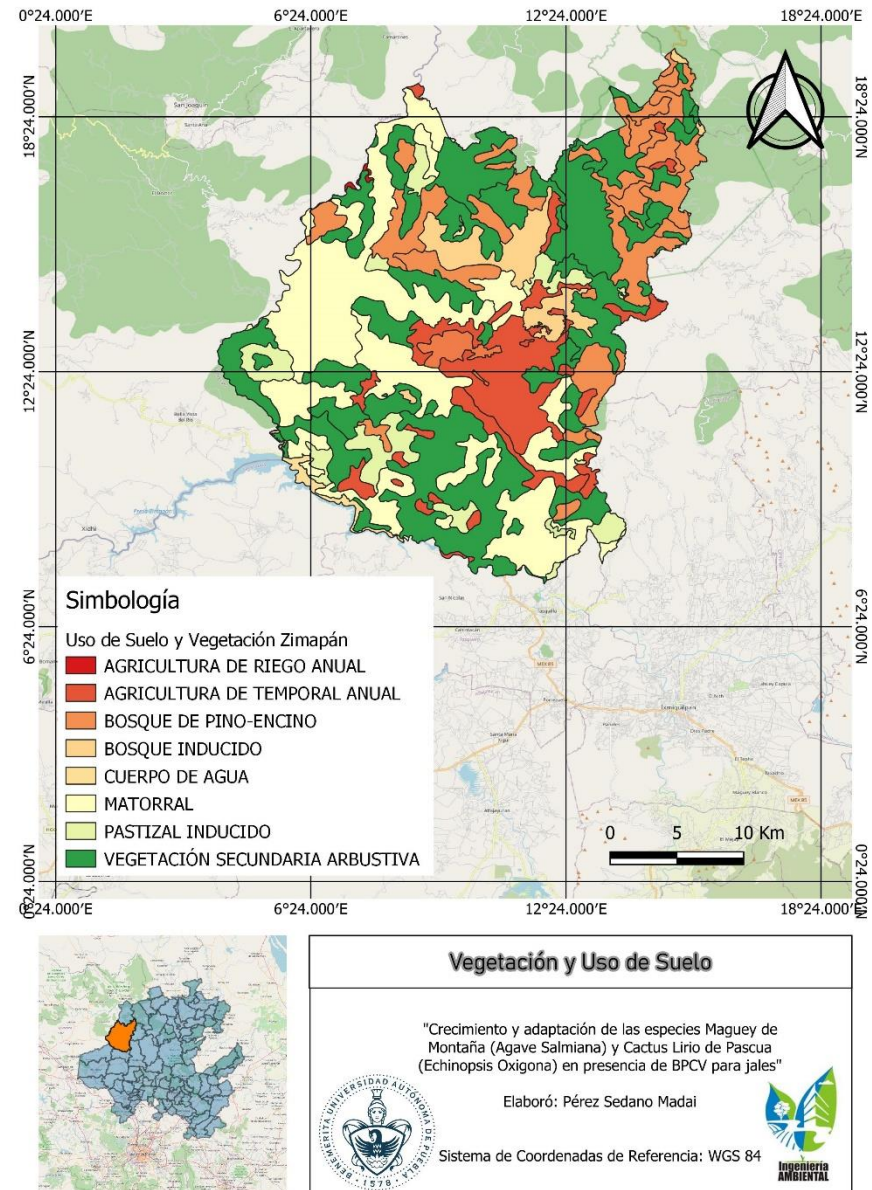
12.1.4 Vegetación

El Municipio se caracteriza por contar con poca vegetación, ya que, por estar incrustado en una zona desértica, encontramos enormes extensiones de nopaleras, arbustos bajos, matorral alto, maguey, órganos, cardones, biznagas, huizaches, ortigas y mezquites (Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, 2011).

12.1.5 Uso de Suelo

El suelo es rico en materia orgánica y nutrientes. En términos de uso del suelo, el 51% se destina a agostaderos, el 8.7% a actividades forestales, el 3% a la agricultura, y el 37.3% corresponde a otros usos.

Respecto a la tenencia de la tierra, el 69% del territorio está bajo régimen ejidal, mientras que el 31% pertenece a pequeñas propiedades. Su uso y explotación radica principalmente en la minería, el suelo del Municipio no es propicio para ejercer la agricultura (Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, 2011).



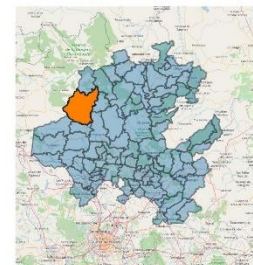
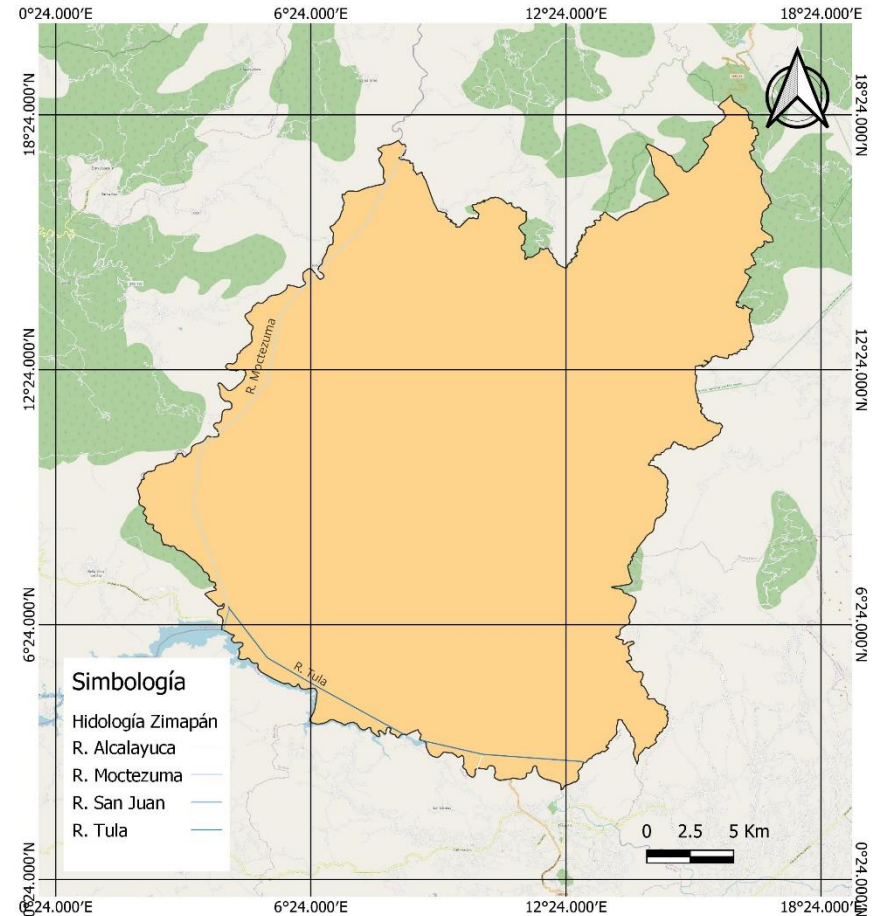
12.1.6 Hidrología



Dentro de las corrientes pluviales más importantes en el municipio destacan los ríos; Tula, el Amajac y el Metztitlán. El río Tula al unirse al río San Juan, toma el nombre de Moctezuma, que es el límite natural con el Estado de Querétaro, por la parte oeste del Municipio. Posteriormente entra en el Estado de San Luis Potosí y forma el río Pánuco. Sólo en época de lluvia se forman pequeños arroyos que riegan algunos sembradíos, como los de Chepinque y Tolimán (Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, 2011).

12.1.7 Topografía

El municipio de Zimapán, en el estado de Hidalgo, se caracteriza por una topografía montañosa, con elevaciones que alcanzan hasta los 2,700 metros sobre el nivel del mar en las zonas más altas, y altitudes mínimas cercanas a los 1,200 metros en las áreas más bajas. Esta variedad de alturas contribuye a su clima diverso y su riqueza ecológica. (Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, 2011)

El municipio se encuentra en una región hidrológica significativa, con sistemas como los ríos Moctezuma y Tula. Además, las características geográficas incluyen barrancas, planicies y sierras que forman parte de la Sierra Madre Oriental, lo que también lo convierte en una zona de alta biodiversidad y potencial turístico.

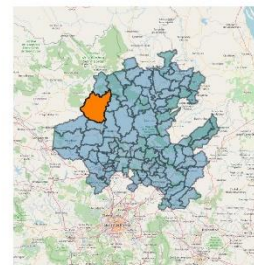
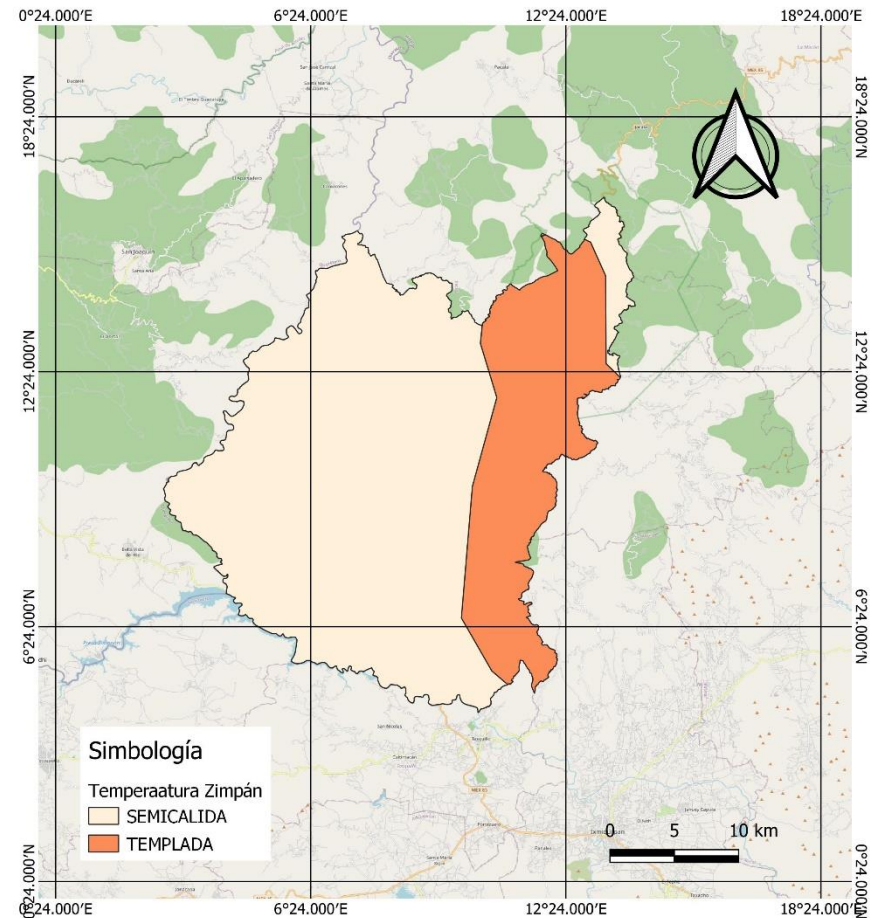


Hidrología Zimapán	
"Crecimiento y adaptación de las especies Magüey de Montaña (Agave Salmiana) y Cactus Lirio de Pascua (Echinopsis Oxigona) en presencia de BPCV para jales"	
Elaboró: Pérez Sedano Madai	
	
Sistema de Coordenadas de Referencia: WGS 84	

12.1.8 Temperatura

El municipio cuenta con un rango de temperatura de 12°C – 20°C y se ha registrado una temperatura media anual de 18.3 °C, La temporada templada dura 2.4 meses, del 26 de marzo al 8 de junio, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 26 °C. El mes más cálido del año en Zimapán es mayo, con una temperatura máxima promedio de 27 °C y mínima de 14 °C (INEGI,2010).


La temporada fresca dura 3.2 meses, del 31 de octubre al 5 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 22 °C. El mes más frío del año en Zimapán es enero, con una temperatura mínima promedio de 6 °C y máxima de 21 °C.




Temperatura Zimapán

"Crecimiento y adaptación de las Especies: Maguey de Montaña (Agave Salmiana) y Cactus Lirio de Pascua (Echinopsis Oxigona) en presencia de BPCV para jales"

Elaboró: Pérez Sedano Madai



Sistema de Coordenadas de Referencia: WGS 84



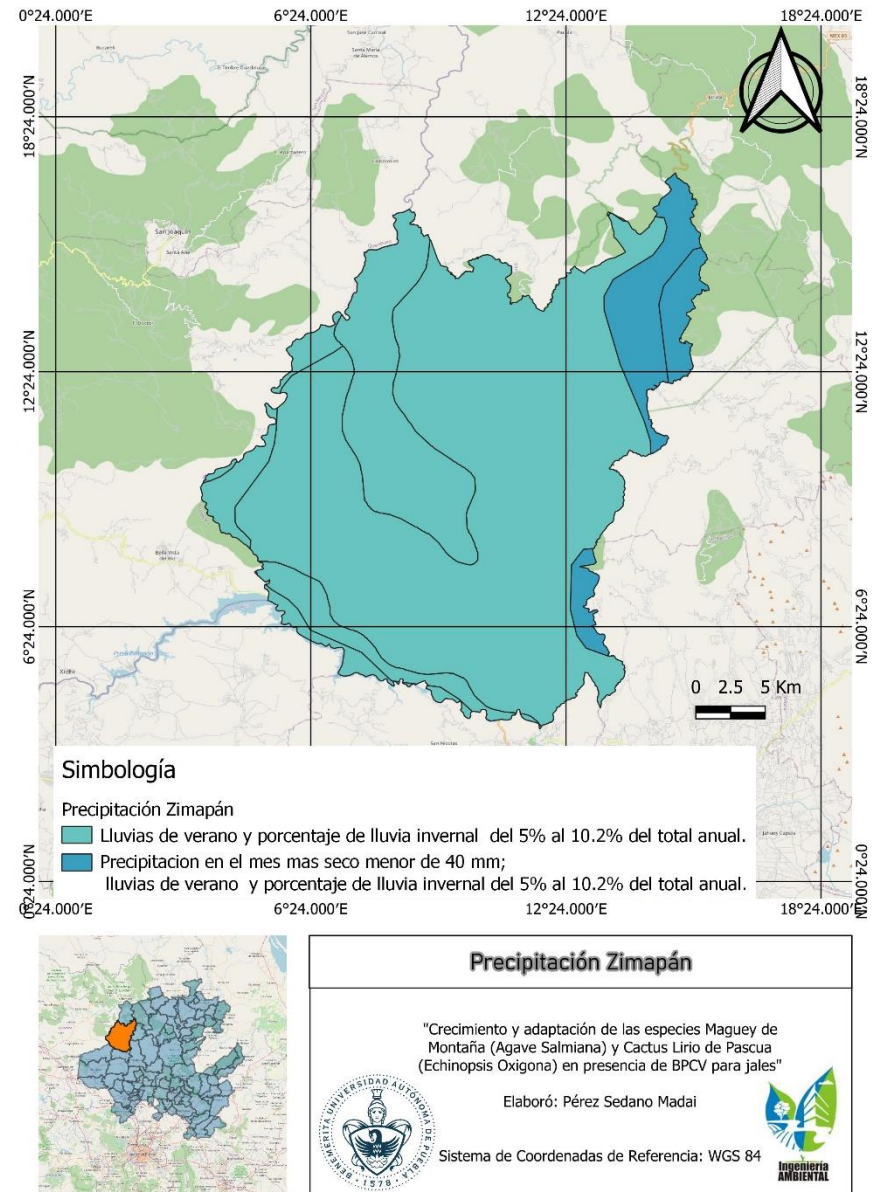
12.1.9 Precipitación

Tiene una precipitación pluvial de 391 milímetros por año y el período lluvioso de mayo a junio. Un día mojado es un día con por lo menos 1 milímetro de líquido o precipitación equivalente a líquido. La probabilidad de días mojados en Zimapán varía muy considerablemente durante el año (Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, 2011).

La temporada más húmeda dura 4.4 meses de mayo a octubre, con una probabilidad de más del 33 % de que cierto día será un día mojado. El mes con más días mojados en Zimapán es julio, con un promedio de 16.8 días con por lo menos 1 mm de precipitación, la temporada más seca dura 7.6 meses, de octubre a mayo. El mes con menos días mojados en Zimapán es diciembre, con un promedio de 2.2 días con por lo menos 1 mm de precipitación.

METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo experimental con un enfoque cuantitativo/cualitativo, para analizar la capacidad de adaptación y crecimiento de las especies vegetales Maguey de Montaña (*Agave Salmiana*) y Cactus Lirio de Pascua (*Echinopsis Oxigona*) en presencia BPCV para Jales mineros.



I. Preparación de Inóculos Bacterianos

Se utilizaron tres cepas bacterianas seleccionadas previamente, que han sido aisladas de la rizosfera de plantas que crecen en jales mineros, las cuales han sido caracterizadas como bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV), las cepas a emplear corresponden a las cepas denominadas 180, 190 y 196.

Para llevar a cabo la propagación de las cepas anteriormente mencionadas se sembraron en Caldo Luria Bertani (LB) en tubos de ensayo, para posteriormente llevar a cabo su magnificación en matraces Erlenmeyer (Imagen 4), las cuales se mantuvieron en incubación a 30°C durante 48 horas.

Posteriormente, las cepas bacterianas se separaron por centrifugación a 8000 rpm durante 15 minutos, luego de obtener la biomasa se realizó un ajuste con buffer de fosfatos 0.1 M (pH 7.4) a 0.5 Å equivalente a 1×10^9 UFC/mL (Mendoza Hernández, Vázquez Delgado, & Castillo Morales, 2019), como se observa en la Imagen 5.



Imagen 4. Magnificación de cepas en Caldo LB. Elaboración propia.



Imagen 5. Centrifugación y ajuste con Solución Buffer de las cepas. Elaboración propia.

II. Selección de Especies Vegetales

Las especies seleccionadas para la investigación son Maguey de Montaña (*Agave Salmiana*) y Cactus Lirio de Pascua (*Echinopsis Oxigona*), debido a que el Agave es una planta de gran resistencia a ambientes hostiles y fácil adaptación puesto que se desarrollan en suelos áridos o semiáridos los cuales son suelos con poca materia orgánica, por el contrario, los cactus son altamente resistentes a condiciones extremas, por lo que ambas especies no requieren de condiciones especiales de cultivo, ni de un mantenimiento excesivo, lo que las hace especies potenciales para la adaptación a los jales.

Las plantas se obtuvieron de los hijuelos que la misma planta madre produce a lo largo de su vida de cada una de las distintas especies vegetales, como se muestra en la Imagen 6 e Imagen 7, para el caso del maguey se seleccionaron especies de más de 15 cm de altura, estos se extrajeron del suelo, para posteriormente realizar un pretratamiento en donde los agaves se limpiaron quitando las raíces y pencas adultas, dejando cicatrizar los hijuelos podados por ocho días para asegurar su crecimiento.



Imagen 6. Maguey de Montaña (*Agave Salmiana*). Elaboración propia



Imagen 7. Cactus Lirio de Pascua (*Echinopsis Oxigona*). Elaboración propia

III. Preparación de Unidades Experimentales

Las unidades experimentales (UE) consisten en una mezcla homogénea de residuos mineros de Zimapán, Hidalgo y sustrato comercial Miracle Grow®, hidratada con agua. Para la ejecución del experimento se utilizaron bolsas de invernadero como macetas, cabe mencionar que se aplicaron diferentes métodos de tratamiento, considerando cada uno por triplicado, para lo cual se estableció que las UE para *Echinopsis Oxigona* son de 0.4 Kg de la mezcla homogénea y para las UE de *Agave Salmiana* es de 1Kg de la mezcla, debido a la forma y altura de la planta. Ambas especies vegetales se sometieron a tratamientos con distintas proporciones de la mezcla homogénea, siendo la primera correspondiente en la que se utilizó 80% jal, 20% sustrato comercial y la segunda que

consistió en 55% jal y 45% sustrato, con el fin de observar el comportamiento de las plantas en las distintas proporciones.

Primeramente, se prepararon las UE para los blancos de cada especie vegetal, los cuales consisten en utilizar solo sustrato comercial Miracle Grow®.

Después, se acondicionaron las UE para los tratamientos de 80% jal, 20% sustrato comercial, además de preparar las UE para los tratamientos de 55% jal, 45% sustrato comercial, como se ilustra en la Imagen 8.

Para este paso se utilizó una balanza granataria de triple haz marca Qwork de $2610g \pm 0.1g$ y se etiquetaron cada una de las UE correspondientemente.



Imagen 8. Preparación de Unidades Experimentales. Elaboración propia.

IV. Plantación e inoculación

Una vez que se tuvieron las unidades experimentales listas, se procedió a plantar una especie vegetal en cada unidad, Imagen 9 para *Agave Salmiana* e Imagen 10 para *Echinopsis Oxigona*, se rotularon las unidades por triplicado para cada tratamiento como se describen en la Tabla 5.



Imagen 9. Plantación de *Agave Salmiana*. Elaboración propia.



Imagen 10. Plantación de *Echinopsis Oxigona*. Elaboración propia.

Tabla 5. Tratamientos de las especies *Agave Salmiana* y *Echinopsis Oxigona* en presencia de BPCV para jales. Elaboración Propia

Especie Vegetal	Proporción	Cepa
<i>Agave Salmiana</i>	100 % Sustrato	Blanco
<i>Agave Salmiana</i>	80% Jal, 20% Sustrato	Testigo
<i>Agave Salmiana</i>	80% Jal, 20% Sustrato	180
<i>Agave Salmiana</i>	80% Jal, 20% Sustrato	190
<i>Agave Salmiana</i>	80% Jal, 20% Sustrato	196
<i>Agave Salmiana</i>	55% Jal, 45% Sustrato	Testigo
<i>Agave Salmiana</i>	55% Jal, 45% Sustrato	180
<i>Agave Salmiana</i>	55% Jal, 45% Sustrato	190
<i>Agave Salmiana</i>	55% Jal, 45% Sustrato	196
<i>Echinopsis Oxigona</i>	100 % Sustrato	Blanco
<i>Echinopsis Oxigona</i>	80% Jal, 20% Sustrato	Testigo
<i>Echinopsis Oxigona</i>	80% Jal, 20% Sustrato	180
<i>Echinopsis Oxigona</i>	80% Jal, 20% Sustrato	190
<i>Echinopsis Oxigona</i>	80% Jal, 20% Sustrato	196
<i>Echinopsis Oxigona</i>	55% Jal, 45% Sustrato	Testigo
<i>Echinopsis Oxigona</i>	55% Jal, 45% Sustrato	180
<i>Echinopsis Oxigona</i>	55% Jal, 45% Sustrato	190
<i>Echinopsis Oxigona</i>	55% Jal, 45% Sustrato	196

Después se procedió a inocular cada unidad con 25 ml de suspensión bacteriana con cada una de las cepas correspondientes al tratamiento (Imagen 11), a excepción de los blancos y los testigos.



Imagen 11. Inoculación de las especies vegetales. Elaboración propia.

V. Seguimiento y Monitoreo

Para dar seguimiento al experimento las plantas se mantuvieron durante 16 semanas, regándolas 2 veces a la semana y al mismo tiempo se monitorearon, midiendo semanalmente los parámetros de altura y ancho de cada una de las hojas y el número de

hojas, esto para el caso de *Agave Salmiana* y para *Echinopsis Oxigona* se midió ancho de planta y altura, con ayuda de una regla y se registró los siguientes parámetros en una base de datos.

Una vez concluido el tiempo de monitoreo, se procedió a retirar las plantas de las macetas, separando cuidadosamente el suelo de la zona radicular de la planta para no causar daños a las raíces; para eliminar los restos del suelo se lavaron en agua destilada. Posteriormente se tomaron fotografías (Imagen 12) de cada planta para medir la longitud de las raíces de cada especie vegetal con ayuda del software Image Tool V. 3.



Imagen 12. Medición de longitud de raíces. Elaboración propia.

Para realizar la cuantificación de las raíces, se propone la siguiente clasificación (Tabla 6) de acuerdo con Robles-Martínez et.al, 2018 quienes realizaron una investigación del efecto de la inoculación con consorcios nativos de hongos de micorriza arbuscular en *Agave angustifolia* Haw., donde se cuantificó el número de raíces clasificándolas únicamente en primarias, secundarias y terciarias, en los diferentes tratamientos.

Tabla 6. Número de raíces de acuerdo con la densidad de raíces de Agave. Elaboración propia.

Rango de densidad	Número de raíces
Muy Alta	100
Alta	80
Media	60
Baja	40
Muy Baja	25

Con ayuda de esta clasificación se llevó a cabo un conteo promedio de las raíces de la planta de acuerdo con la densidad de raíces que se observa en cada tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El parte experimental del proyecto se llevó a cabo durante los meses de junio a septiembre del año 2024, los cuales son considerados como los más calurosos y lluviosos con una temperatura máxima promedio de 25°C y una precipitación media de 1 000 mm anual en el municipio de Tecali de Herrera del estado de Puebla.

i. Porcentaje de Supervivencia

En la especie Maguey de Montaña (*Agave Salmiana*), se observó una supervivencia del 100% en los Blancos, Testigos y proporciones de 55% Jal - 45% sustrato para las Cepas 180, 190 y 196; y para 80% Jal - 20% sustrato en las Cepas 180 y 190. En la cepa 196 en proporción 80 % Jal - 20% sustrato se presentó una supervivencia del 66.66%, ya que un individuo no sobrevivió esto, debido posiblemente a su tamaño pequeño que no le permitió la supervivencia bajo esas condiciones de estrés.

El Cactus Lirio de Pascua (*Echinopsis Oxigona*) presentó una supervivencia del 100% en Blancos, Testigos y Cepas 180, 190 y 196 en ambas proporciones.

Respecto de lo anteriormente, se infiere que estas especies, además de ser Xerófitas, tienen la capacidad de adaptarse y desarrollar mecanismos de tolerancia en condiciones de toxicidad, como es el caso de la exposición a EPT presentes en los jales mineros, los cuales pueden ser causantes de fitotoxicidad y alteraciones en los procesos fisiológicos de la planta, lo cual puede afectar su desarrollo y crecimiento, llegando incluso a provocar su muerte.

ii. Adaptación y Crecimiento

Algunos de los aspectos importantes para evaluar adaptación y crecimiento de las plantas son factores como altura, ancho, despliegue de nuevas hojas, longitud de raíces y número de raíces, presentado en las Tablas 7 y 12 de las especies *Agave Salmiana* y *Echinopsis Oxigona*, respectivamente, donde se puede observar el crecimiento en los diferentes tratamientos, destacando los parámetros que se encuentran en color rojo.

Tabla 7. Parámetros de crecimiento de *Agave Salmiana*, antes y después de tratamientos. Elaboración propia.

Agave Salmiana								
Tratamiento (T)	Altura (cm)		Ancho (cm)		Número de Hojas		Longitud de Raíz (cm)	Densidad de Raíces
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después		
Blanco (Sustrato)	15.5	16.1	6.1	7.4	4.66	5	34.923	73.3
55% Jal – 45% Sustrato								
Testigo (Jal + Sustrato)	16.5	16.9	5.9	6.7	5.66	6.33	44.47	46.66
Cepa 180	16.8	16.8	6.3	6.7	5.66	6	26.7	53.33
Cepa 190	17.1	17.1	7	7.2	5.33	5.66	38.2	86.66
Cepa 196	15.9	16.2	4.5	5.9	4.66	4.66	30.4	60
80 % Jal – 20% Sustrato								
Testigo	16.4	16.6	6.2	6.8	5.66	5.66	39.07	30
Cepa 180	16.9	17.5	4.9	5.2	5	5	44.560	35
Cepa 190	18.2	18.5	5.4	6.4	5	5.33	29.530	46.66
Cepa 196	15.8	15.8	5	5.6	5	5	21.523	41.66

En la adaptabilidad a condiciones de estrés ambiental bajo la presencia de EPT en jales mineros se observó cambio de coloración de un verde pálido a un verde vivo y brillante, surgimiento de rugosidad, pérdida de turgencia, enrollamiento y muerte en las puntas de las hojas en *Agave Salmiana*, por otra parte, la especie *Echinopsis Oxigona* limita su crecimiento en el ancho de la planta, donde se comprimen las costillas de la planta debido a la pérdida de turgencia, además de mostrar colores más pálidos, por lo que la presencia de EPT en tejidos vegetales ocasiona trastornos histológicos que inhiben el crecimiento y afectan la fotosíntesis (Ouyang et al., 2012; Peláez et al., 2014), así como la absorción y transporte de agua, la transpiración, la nutrición mineral y la asimilación de elementos esenciales. Además, los iones metálicos pueden interactuar con el núcleo celular, provocando daños en el ADN, tales como modificaciones en las bases nitrogenadas, alteraciones en el ciclo y división celular (Bonilla Buitrago R., González de Bashan L. E., & Pedraza, R. O., 2021).

La interacción entre planta-bacteria no solo reduce el estrés ambiental de los jales mineros, sino que también mejora la eficiencia en la captación de nutrientes, estimulando un crecimiento adaptativo de la planta, especialmente en condiciones de estrés ambiental como suelos pobres en nutrientes, sequía o presencia de EPT.

Tabla 8. Anova de dos vías univariados de altura de la hoja de *Agave Salmiana*. Elaboración propia

Altura de la Hoja					
	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la Media	Valor F	Valor P
Proporción Jal-Sustrato	2	-0.01446	-0.00723	-0.21221	---
Tratamiento	4	0.15319	0.0383	1.1243	0.34796
Interacción	8	10.29786	1.28723	37.78886	<0.0001
Modelo	14	93.33645	6.66689	195.71764	<0.0001
Error	129	4.39423	0.03406		
Corregida	143	97.73068			

La especie *Agave Salmiana* muestra un crecimiento lento en la altura de las hojas, el cual es independientemente de la concentración de Jal – Sustrato, en el análisis ANOVA (Tabla 8) se observa una diferencia significativa ($p < 0.05$) en la interacción entre la proporción de jales y los tratamientos efectuados con BPCV, destacando un efecto significativo en la Cepa 180 en proporción 80% Jal – 20% Sustrato respecto de las demás cepas y proporciones, con una diferencia de 0.6 cm en relación con la altura inicial.

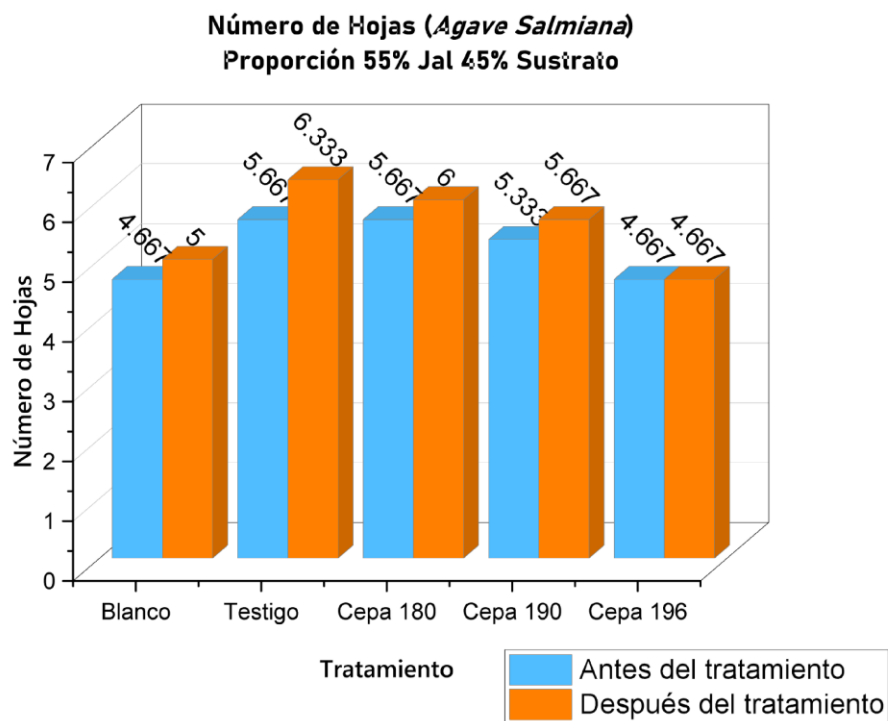
El crecimiento de la altura de la hoja es más lento que el ensanchamiento y engrosamiento, por lo que, es un indicador clave de adaptación y crecimiento de la planta, debe señalarse que en todos los tratamientos las hojas tienden a ensancharse con una diferencia significativa ($p < 0.05$) (Tabla 9), donde el aumento del ancho de la hoja se ve afectado a mayor proporción de jal – sustrato, haciéndose notar la cepa 196 en proporción 55% Jal – 45% Sustrato y la cepa 190 en proporción 80% Jal – 20% Sustrato con una diferencia de 1.4 cm y 1 cm del valor inicial respectivamente, por lo que éstas cepas son capaces de estimular el crecimiento del ancho a diferentes concentraciones. Las BPCV mejoran el desarrollo radicular y la expansión celular en las hojas al producir fitohormonas como auxinas, las cuales pueden favorecer un crecimiento lateral (ancho) en lugar de longitudinal (altura) bajo ciertas condiciones de estrés, lo que coincide con lo observado en este experimento y lo señalado por Glick, B. R., 2012.

Tabla 9. Anova de dos vías univariados de ancho de la hoja de *Agave Salmiana*. Elaboración propia.

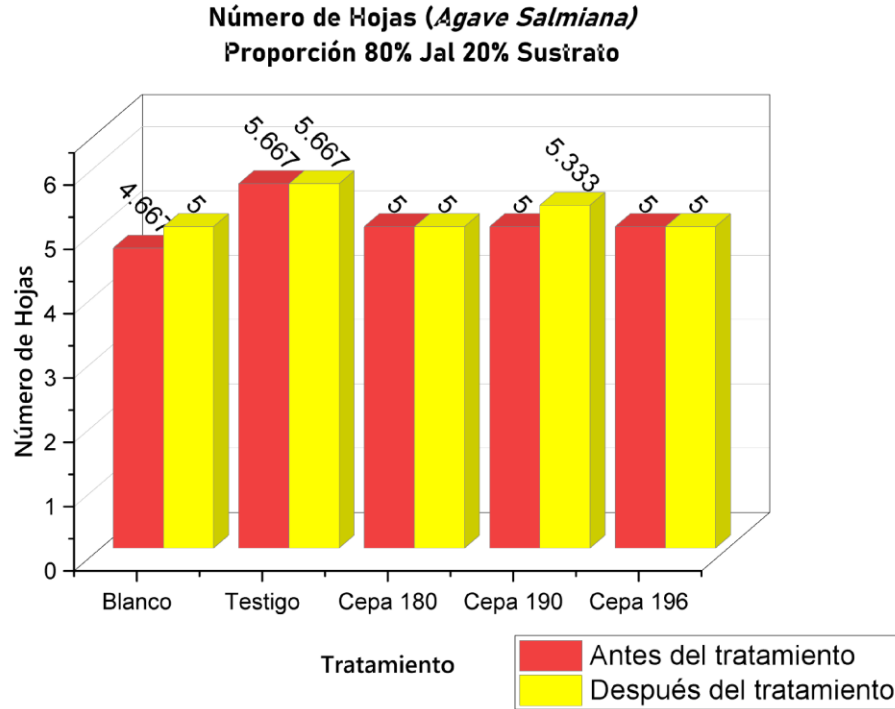
Ancho de la Hoja					
	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la Media	Valor F	Valor P
Proporción Jal-Sustrato	2	-0.07702	-0.03851	-0.35264	---
Tratamiento	4	0.70219	0.17555	1.60741	0.1763
Interacción	8	18.57442	2.3218	21.2596	<0.0001
Modelo	14	68.31041	4.87932	44.67749	<0.0001
Error	129	14.08834	0.10921		
Corregida	143	82.39876			

Los agaves al ser plantas con metabolismo CAM, utilizan sus hojas como principales reservorios de agua y nutrientes. En suelos pobres en nutrientes como lo son los jales mineros, la planta puede priorizar la expansión en ancho para aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes por lo que optimiza estas reservas en condiciones adversas, en lugar de crecer en altura, lo que les permite minimizar la pérdida de agua y soportar mejor las condiciones extremas, como sequía o alta radiación, además, el ensanchamiento de las hojas permiten una mayor superficie para captación de luz solar, compensando así la limitación de recursos disponibles en el suelo (Cushman, J. C., & Bohnert, H. J., 2000; Nobel, P. S., 2003).

Por otra parte, en respuesta a la adaptación y crecimiento de condiciones ambientales causadas por estrés en presencia de jales, se apreció la abertura de disposición helicoidal en la roseta de la planta, es decir, las hojas tienden a abrirse y separarse en relación con la estructura espiral, lo cual indica que la planta no solo sobrevive a estas condiciones sino que también se hace evidente el despliegue de nuevas hojas, mayoritariamente en los tratamientos con la Cepa 180 de la proporción 55% Jal - 45% Sustrato y la Cepa 190 en ambas proporciones, por lo que a mayor proporción jal-sustrato se inhibe el desarrollo de nuevos brotes, como se observa en las gráficas 1 y 2.



Gráfica 1. Comportamiento de crecimiento de las Hojas de *Agave Salmiana* en proporción 55% Jal 45% Sustrato. Elaboración propia.



Gráfica 2. Comportamiento de crecimiento de las Hojas de *Agave Salmiana* en proporción 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

El desarrollo de nuevas raíces representa un factor importante de adaptación en la planta debido al pretratamiento recibido (Imagen 13), ya que el sistema radicular cumple la función de satisfacer diversas necesidades, como anclaje al sustrato, absorción, distribución y almacenamiento de agua y nutrientes esenciales. De acuerdo con Du et al., 2018 menciona que la raíz es el órgano principal que retiene EPT debido a su adsorción y quelación mediante fitoquelatinas y compartimientos vacuolares, además de ello, la actividad microbiana en la rizosfera afecta los patrones de enraizamiento y el suministro de nutrientes disponibles a las plantas, modificando así la calidad y cantidad de los exudados de las raíces.



Imagen 13. Pretratamiento de *Agave Salmiana*. Elaboración propia.

Tabla 10. Anova de dos vías univariados de Longitud de Raíces de Agave Salmiana. Elaboración propia.

Longitud de Raíces					
	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la Media	Valor F	Valor P
Proporción Jal-Sustrato	2	-2.74422E-27	-1.37211E-27	-4.15036	---
Tratamiento	4	1.48823E-26	3.72057E-27	11.25396	<0.0001
Interacción	8	3976.52911	497.06614	1.50352E30	<0.0001
Modelo	14	8105.68427	578.97745	1.75129E30	<0.0001
Error	129	4.26475E-26	3.30601E-28		
Corregida	143	8105.68427			

El patrón de enraizamiento se ve afectado al entrar en contacto con jales, lo cual se confirma en el análisis estadístico ANOVA con una diferencia significativa ($p < 0.05$) (Tabla 10), en los factores de diferentes tipos de cepa y su interacción con la concentración.

En los testigos de ambas proporciones de jal-sustrato (Imagen 14) se aprecia mayormente el desarrollo de raíces primarias, las cuales son gruesas y tienen una gran elongación como una respuesta al estrés, buscando así explorar zonas menos tóxicas en profundidad, tener un mayor volumen de contacto de suelo para compensar la baja disponibilidad de nutrientes, además de que ello es una respuesta que desarrolla la planta alargando las raíces en lugar de desarrollar raíces laterales y pelo radicular, lo que resulta en un sistema radicular más simple pero más profundo (Nobel, P. S., 2003; Glick, B. R. 2012; Chibuike, G. U., & Obiora, S. C. 2014). Esto, representando una estrategia de supervivencia basada en resistencia y detoxificación.



Imagen 14. Testigo de Agave Salmiana. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

De esta manera la presencia de BPCV toman un papel muy importante en la presente investigación, donde se distingue que debido a su presencia se desarrollan gran cantidad de pelos radiculares en comparación con los testigos, lo cual se confirma con el ANOVA, ya que el número de raíces (Tabla 11) es significativamente diferente ($p < 0.05$) en proporción jal-sustrato, tipo de tratamiento e interacción entre los dos anteriores; por lo que las bacterias mejoran la biodisponibilidad de nutrientes dando paso a las moléculas como el ácido indolacético (AIA), giberelinas y citoquininas, producidas en la rizosfera dentro de los tejidos de la planta, favoreciendo la división celular, estimulando la formación de pelos radiculares, lo que a su vez incrementa la capacidad de absorción de nutrientes, ya que amplía la superficie disponible para la captación de recursos esenciales para la planta (Moreno A., et al., s/f). La Cepa 190 sobresale en los tratamientos de ambas proporciones, donde existe una mayor cantidad de raíces próximas al tronco, promoviendo el desarrollo de raíces primarias, secundarias y terciarias como se observa en la imagen 16, por lo que las raíces de las plantas pueden prevenir el ingreso de los metales al interior de la planta al precipitar los iones metálicos presentes en el suelo mediante exudados radicales como el malato, el oxalato y el citrato (Hossain et al., 2012). Además, las BPCV solubilizan fosfatos, fijan nitrógeno y mejoran la biodisponibilidad de micronutrientes en el suelo, observándose un comportamiento favorable en la Cepa 180 y 196 como se observa en las imágenes 15 y 17 correspondientemente, con una gran cantidad de pelos radiculares. Sin embargo, a pesar de este comportamiento se puede inferir que en situación de estrés por EPT presentes en los jales mineros, la zona radicular es afectada en una mayor proporción de jal- sustrato.

Tabla 11. Anova de dos vías univariados de Número de Raíces de *Agave Salmiana*. Elaboración propia.

Número de Raíces					
	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la Media	Valor F	Valor P
Proporción Jal-Sustrato	2	1.22141E-25	6.10704E-26	8.48344	3.45647E-4
Tratamiento	4	2.03679E-25	5.09199E-26	7.07341	<0.0001
Interacción	8	2977.7486	372.21858	5.17058E28	<0.0001
Modelo	14	42498.76543	3035.6261	4.21687E29	<0.0001
Error	129	9.28642E-25	7.19877E-27		
Corregida	143	42498.76543			



A.

B.

Imagen 15. *Agave Salmiana* en presencia de Ceba 180. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.



A.

B.

Imagen 16. *Agave Salmiana* en presencia de Ceba 190. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

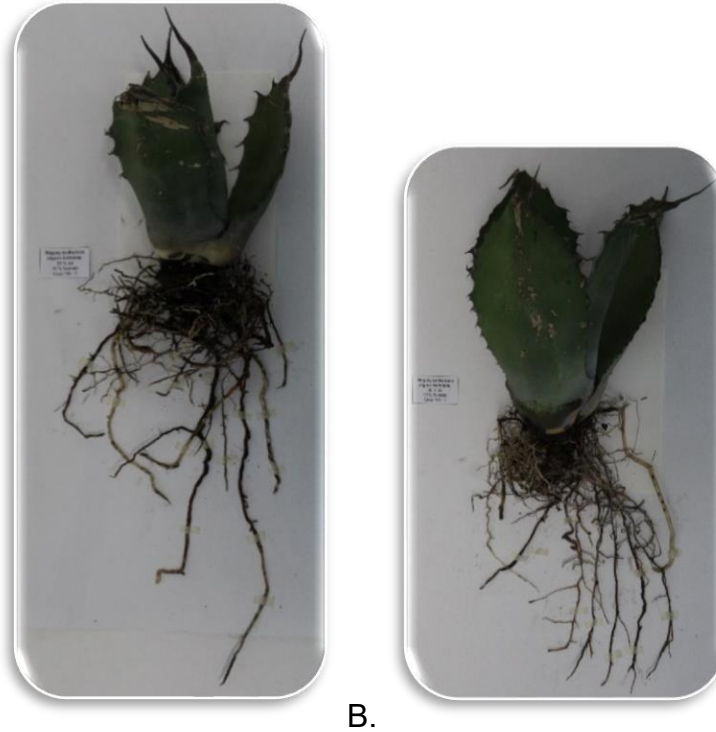


Imagen 17. *Agave Salmiana* en presencia de Ceba 196. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

En conclusión, *Agave Salmiana* se adapta y crece al entrar en contacto con EPT presentes en los jales mineros en ambas proporciones, no obstante, el comportamiento de los parámetros de crecimiento estudiados es diferente, mostrando que en una menor proporción de jales mineros hubo mejor respuesta de adaptación y crecimiento de la planta, siendo evidente en el despliegue de nuevas hojas, ensanchamiento y sobre todo en desarrollo de la zona radicular de la planta, en donde la cepa 190 tiene una mayor capacidad de estimulación del crecimiento.

Tabla 12. Parámetros de crecimiento de *Echinopsis Oxigona*, antes y después de tratamientos. Elaboración propia.

<i>Echinopsis Oxigona</i>						
Tratamiento (T)	Altura (cm)		Ancho (cm)		Longitud de Raíz (cm)	Número de Raíces
	Antes T	Después T	Antes T	Después T		
Blanco (100% Sustrato)	4.66	6.5	3.1	4.8	14.9	100
55% Jal - 45% Sustrato						
Testigo	5.1	5.6	3.8	3.6	6.3	35
Cepa 180	4.9	5	3.6	3.8	6	66.66
Cepa 190	5.1	5.7	3.5	3.5	5.2	66.66
Cepa 196	4.6	4.7	3.6	3.6	4.1	53.33
80% Jal - 20% Sustrato						
Testigo	5.2	5.2	3.5	3.5	4.2	30
Cepa 180	4.9	4.8	3.2	3.3	3.9	53.33
Cepa 190	4.3	4.7	3.4	3.4	4.1	41.66
Cepa 196	5.1	5.7	3.2	2.8	2.5	30

El crecimiento en altura de *Echinopsis Oxigona* en contacto con EPT es relativamente lento, de acuerdo con el análisis estadístico ANOVA (Tabla 13) no hay diferencia significativa en relación a la concentración y la asistencia de BPCV, sin embargo, hay que señalar que el tratamiento con la Cepa 190 sobresale de los demás tratamientos en proporción 55% Jal – 45% Sustrato con una diferencia de 0.6 cm de altura sobre la inicial, por otra parte, en proporción 80% Jal – 20% Sustrato destacan la Cepa 196 y 190 con una variación de altura de 0.6 cm y 0.4 cm correspondientemente.

Tabla 13. Anova de dos vías univariados de Altura de la planta de *Echinopsis Oxigona*. Elaboración propia.

Altura					
	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de las Medias	Valor F	Valor P
Proporción Jal-Sustrato	2	1.15464	0.57732	1.49417	0.22782
Tratamiento	4	0.75799	0.1895	0.49044	0.74275
Interacción	8	3.16593	0.39574	1.02422	0.42043
Modelo	14	16.32709	1.16622	3.0183	4.18416E-4
Error	147	56.79831	0.38638		
Corregida	161	73.1254			

Una muestra de que la especie se adapta es el ensanchamiento del cuerpo de la planta, no obstante, *Echinopsis Oxigona* se ve afectada en este parámetro en comparación a las condiciones normales, por lo que limita su capacidad de desarrollo ya que la presencia de

EPT en los tejidos vegetales puede generar efectos tóxicos, especialmente cuando son transportados hacia las partes aéreas de la planta, lo que se observa en la disminución en el ancho de la planta donde las costillas se comprimen, una característica importante que se debe señalar, es que de acuerdo a lo observado en las gráficas 10 y 13 en el ANEXO 1, el ancho de la planta se comprimió al entrar en contacto con los jales mineros mayormente en grandes cantidades de jales, sin embargo, una vez que la planta se adaptó se ensanchó a su estado inicial en la mayoría de los casos.

El cactus al ser extraído de plantas madre presentaba una mínima cantidad de raíces, por lo que el desarrollo de nuevas raíces en *Echinopsis Oxigona* es un indicador de adaptación y tolerancia a jales mineros debido a la baja disponibilidad de nutrientes y problemas de retención de agua que inhiben el crecimiento de la planta, por lo que la especie cambia su estructura radicular en presencia de jales, las cuales tienden a ser superficiales, en gran cantidad, mostrando una estructura fasciculada, donde las raíces son del mismo tamaño y grosor.

En la variable de longitud de raíces, el ANOVA (Tabla 14) muestra que son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$), observando que la longitud de las raíces es afectada por la alta toxicidad de los jales en comparación con los blancos (Imagen 18), ya que estas tienden a ser más cortas, sin embargo, en respuesta de adaptación, las raíces son más gruesas permitiendo profundizar y sobrevivir a estas condiciones. Además, que a menor de proporción de jal las raíces tienden a tener la misma elongación en presencia de BPCV y en gran cantidad alrededor de la base del tallo de la planta.

Tabla 14. Anova de dos vías univariados de Longitud de Raíces de *Echinopsis Oxigona*. Elaboración propia.

Longitud de raíces					
	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la Media	Valor F	Valor P
Proporción Jal-Sustrato	2	-4.77245E-29	-2.38622E-29	-2.4459	---
Tratamiento	4	2.56615E-27	6.41536E-28	65.75796	<0.0001
Interacción	8	6.6293	0.82866	8.49385E28	<0.0001
Modelo	14	1916.0396	136.85997	1.40282E31	<0.0001
Error	147	1.43414E-27	9.75603E-30		
Corregida	161	1916.0496			

El número de raíces son significativamente diferentes de acuerdo con el ANOVA (Tabla 15), resaltando los tratamientos con las Cepas 180 (Imagen 20) y 190 (Imagen 21) en ambas proporciones, por lo que estas bacterias estimulan el crecimiento de la zona radicular de la planta principalmente en proporción 55% Jal 45% Sustrato, por lo que la presencia de BPCV juegan un papel muy importante debido a que propician la generación de una mayor cantidad de raíces en la base del tallo de la planta lo que puede ayudar a la absorción de nutrientes, que como ya se mencionó en párrafos anteriores generan la producción de auxinas, gibelerinas, solubilización de fosfatos, que hacen contrapeso a la

alta toxicidad de los jales mineros, la alta compactación y baja retención de agua de los mismos, por lo cual el desarrollo de nuevas raíces representa una respuesta de adaptabilidad y tolerancia a EPT.

Tabla 15. Anova de dos vías univariados de Número de Raíces de Echinopsis Oxigona. Elaboración propia.

Número de raíces					
	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la Media	Valor F	Valor P
Proporción Jal-Sustrato	2	-9.69505E-26	-4.84753E-26	-21.7113	---
Tratamiento	4	2.52618E-25	6.31546E-26	28.28592	<0.0001
Interacción	8	2349.71729	293.71466	1.3155E29	<0.0001
Modelo	14	73673.8236	5262.41597	2.35695E30	<0.0001
Error	147	3.2821E-25	2.23272E-27		
Corregida	161	73673.8236			



Imagen 18. Blanco Echinopsis Oxigona. Elaboración propia

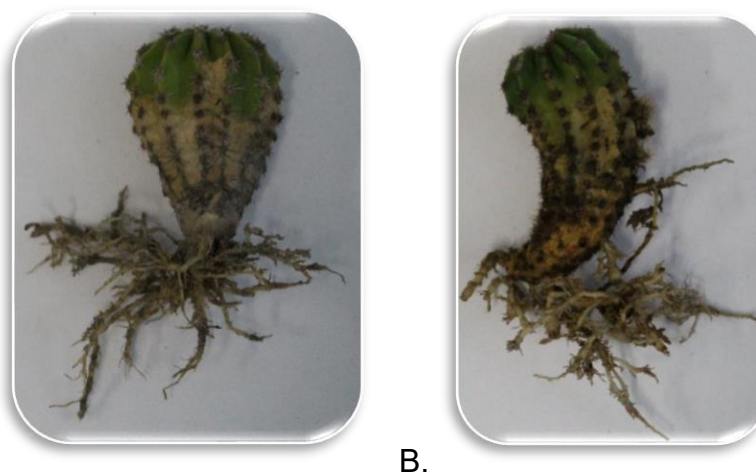


Imagen 19. Testigo de Echinopsis Oxigona. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

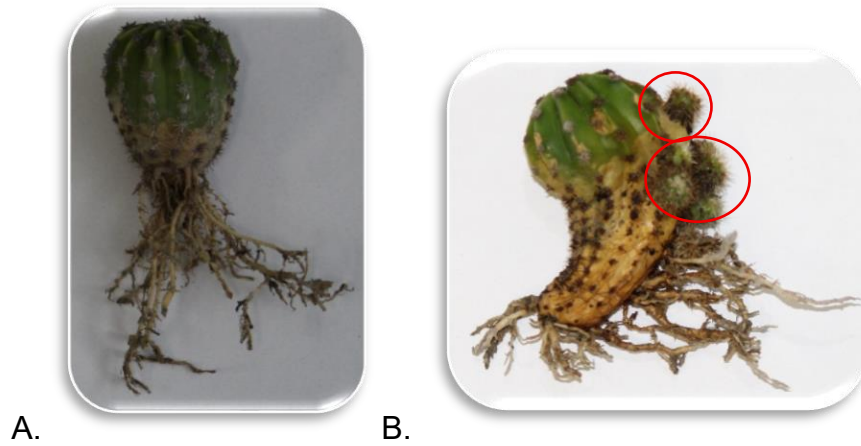


Imagen 20. *Echinopsis Oxigona* en presencia de Cepa 180. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

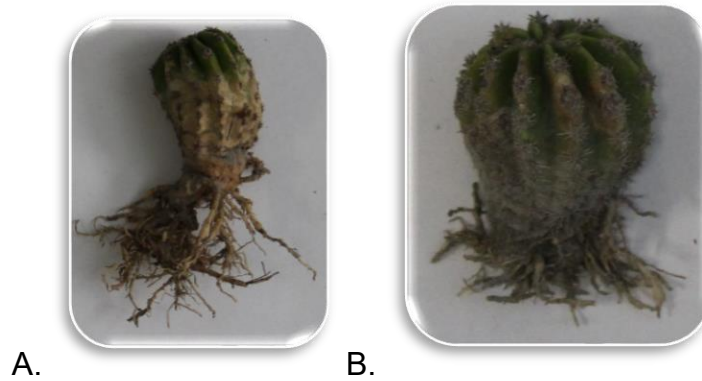


Imagen 21. *Echinopsis Oxigona* en presencia de Cepa 190. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

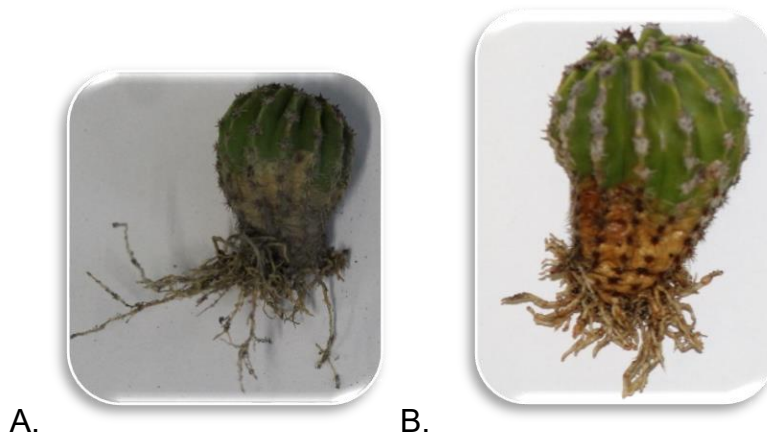


Imagen 22. *Echinopsis Oxigona* en presencia de Cepa 196. A. 55% Jal 45% Sustrato B. 80% Jal 20% Sustrato. Elaboración propia.

Para finalizar, *Echinopsis Oxigona* en presencia de la Cepa 180 desarrolla mejor respuesta de crecimiento que las demás para ambas proporciones de jal-sustrato, sin embargo, en una concentración de 55% Jal 45% Sustrato la especie se encuentra en un menor estrés, lo que le permite que las raíces elonguen más que en una concentración

de 80% Jal 20% Sustrato, resaltando que un individuo desarrolló hijuelos (Imagen 20.B), por lo que esto es un signo de adaptación y reproducción de la planta en condiciones extremas. Al mismo tiempo se observó mayor crecimiento en altura en menor concentración de jal-sustrato. Por lo observado, *Echinopsis Oxigona* inhibe su crecimiento a mayor presencia de EPT de los jales mineros, sin embargo, desarrolla mecanismos de tolerancia que le permiten sobrevivir en estas condiciones.

Al evidenciar una diferencia significativa marcadas en color rojo en la interacción concentración de jales mineros y tratamientos efectuados con BPCV, en los análisis ANOVA de dos vías para ambas especies vegetales es necesario realizar pruebas adicionales, en este caso las pruebas de Tukey mostradas en el ANEXO 2 que relacionan y confirman los resultados obtenidos.

DISCUSIÓN

La contaminación por jales mineros representa un riesgo para la salud humana y el medio ambiente ya que la presencia de altas concentraciones de EPT son tóxicos para la salud y los ecosistemas, por lo que en esta investigación se evaluó la adaptación y crecimiento de *Agave Salmiana* (Maguey de Montaña) y *Echinopsis Oxigona* (Cactus Lirio de Pascua) ante estas condiciones de estrés y así establecer si las especies son viables para una alternativa de descontaminación.

En el presente proyecto se determinó que *Agave Salmiana* se adapta y crece en presencia de BPCV en jales mineros, esto se evidencia en el aumento del ancho de las hojas comúnmente denominadas pencas, además de mostrar el despliegue de nuevas hojas y el desarrollo de gran cantidad de raíces, lo cual coincide con lo expuesto por Bautista-Cruz, Angélica, & Martínez-Gallegos, Verónica., 2020, en donde los autores encontraron que las plantas de la especie *Agave potatorum Zucc.* tuvieron un efecto positivo del 90% en las variables de crecimiento analizadas (volumen radicular, el despliegue de nuevas hojas, diámetro del tallo, diámetro de la roseta, etc.) en asistencia de bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre las cuales se han reportado como BPCV.

Al evidenciar la adaptación y crecimiento de *Agave Salmiana* en presencia de BPCV en jales mineros, se sugiere la investigación de esta planta como posible restauradora ecológica de jales mineros, ya que estudios demuestran que esta especie ayuda a la retención de las partículas del suelo, lo que beneficiaría a la recuperación de la cubierta vegetal (Cerillos G., 2021).

Por otra parte, el experimento con *Echinopsis Oxigona* mostró una supervivencia del 100% en las distintas concentraciones de EPT, esta especie desarrolla tolerancia, adaptándose y creciendo en jales mineros, lo cual concuerda con Macedo H. y Medina Susan, 2022 en donde encontraron que *Melocactus peruvianus* y *Haageocereus acranthus* tienen la capacidad de adaptarse a suelos contaminados por relaves mineros y son potenciales fitorremediadores, por lo que es importante realizar un análisis de bioacumulación de EPT en esta especie para determinar su potencial fitorremediador.

Además, se observó que en la presencia de EPT existe un mayor crecimiento en la altura de la planta, afectando el ancho, que de acuerdo con Nedae Ziabari, S. Z. et al., 2024 la toxicidad de los EPT afecta los procesos fisiológicos, morfológicos y anatómicos de las plantas, lo que desencadena la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) en situaciones de estrés. Sin embargo, esta especie tiene una alta capacidad de tolerancia y desarrollo de nuevas raíces, los cuales son factores que indican crecimiento de la planta en distintas concentraciones de jal-sustrato.

CONCLUSIONES

Las especies *Agave Salmiana* y *Echinopsis Oxigona* desarrollan tolerancia a jales mineros, dado que se adaptan y crecen a en presencia de diversas proporciones de jales, por lo que se comprueba la hipótesis alternativa.

Agave Salmiana refleja su crecimiento en el ensanchamiento, engrosamiento, desenrollamiento de nuevas hojas y desarrollo de raíces primarias, secundarias y terciaras, cambio de coloración de las hojas dado que a pesar de estar en contacto con jales mineros presentan una tonalidad verde brillante.

Se evidencia que a menor concentración de jales mineros hay una mejor adaptación y crecimiento de la planta

Se observa que la Cepa 190 presenta el mejor desempeño en el crecimiento de la planta para ambas proporciones jal-sustrato.

En *Echinopsis Oxigona* el crecimiento es lento, sin embargo, muestra crecimiento en altura y desarrollo de nuevas raíces, las cuales son gruesas y en gran cantidad en la base del tallo de la planta.

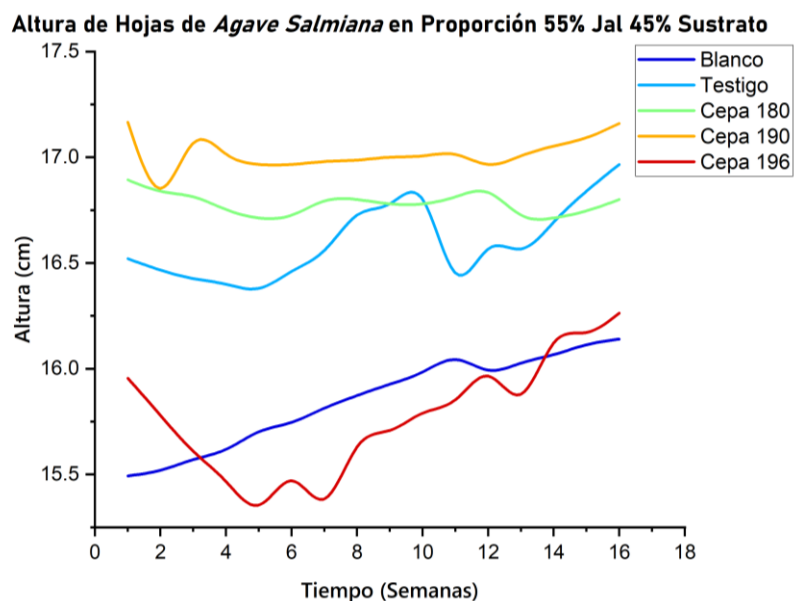
La Cepa 180 promueve el crecimiento en ambas proporciones jal – sustrato, sin embargo, a la concentración de 55% Jal 45% Sustrato, *Echinopsis Oxigona* evidencia un menor estrés al lograr mayor elongación de las raíces.

Respecto de la concentración de 80% Jal 20% Sustrato, *Echinopsis Oxigona* inhibe su crecimiento debido a la mayor presencia de EPT, sin embargo, desarrolla mecanismos de tolerancia como la formación de raíces primarias gruesas y abundantes.

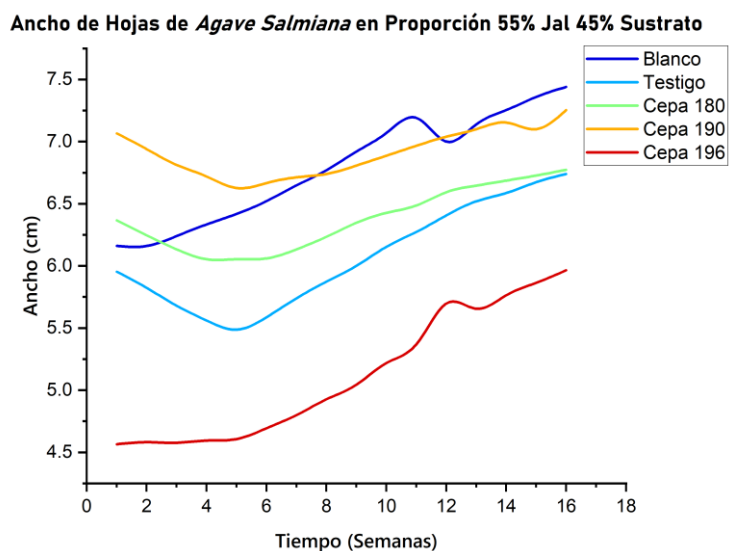
ANEXOS

ANEXO 1: Gráficas del crecimiento de *Agave Salmiana* y *Echinopsis Oxigona*.

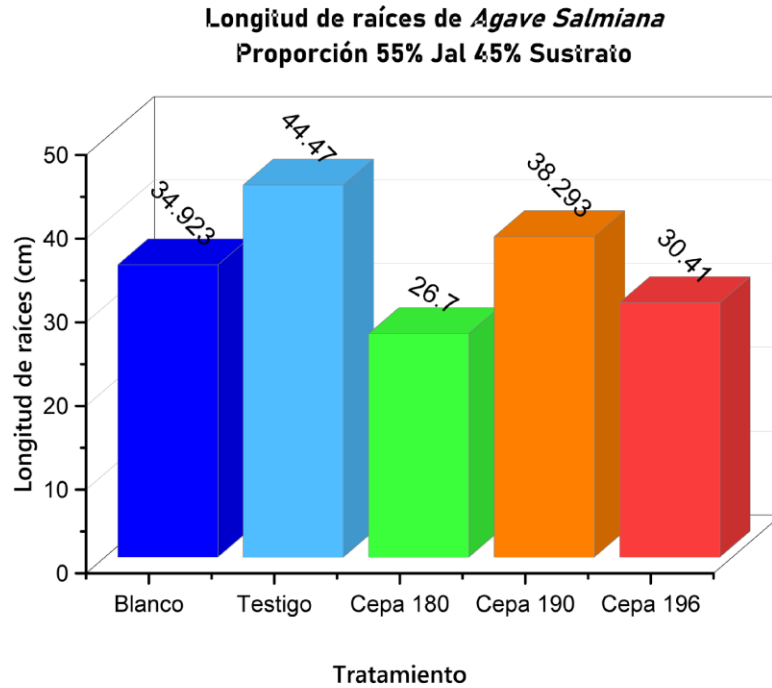
A continuación, se presentan las gráficas de los parámetros de crecimiento en proporción 55% Jal - 45% Sustrato (Gráfica 1 – Gráfica 4) y 80% Jal - 20% Sustrato (Gráfica 5 – Gráfica 8) de *Agave Salmiana*, haciendo mención que lo mostrado en las gráficas es un promedio de los datos que fueron generados por triplicado.



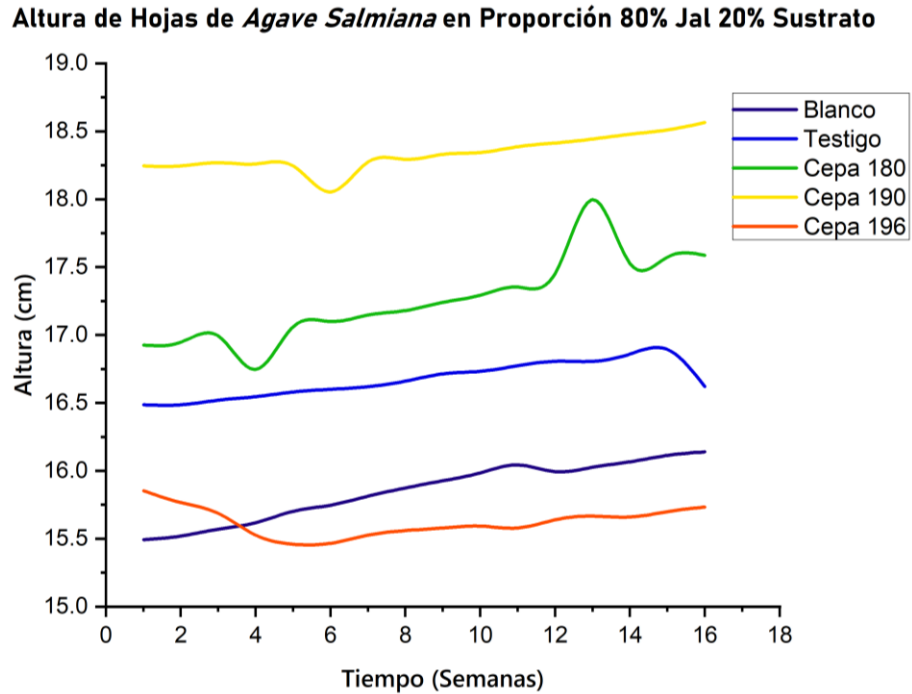
Gráfica 3. Altura de hojas vs Tiempo de Crecimiento de *Agave Salmiana* plantados en proporción 55% Jal - 45% Sustrato. Elaboración propia.



Gráfica 4. Ancho de hojas vs Tiempo de Crecimiento de *Agave Salmiana* plantados en proporción 55% Jal - 45% Sustrato. Elaboración propia.

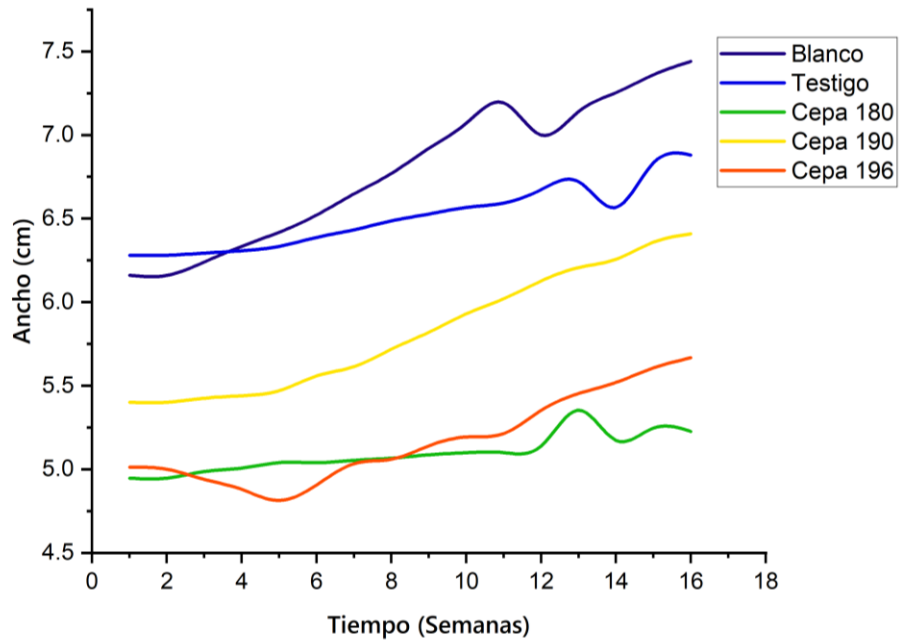


Gráfica 5. Longitud de las Raíces de *Agave Salmiana* en proporción 55% Jal - 45% Sustrato. Elaboración propia.



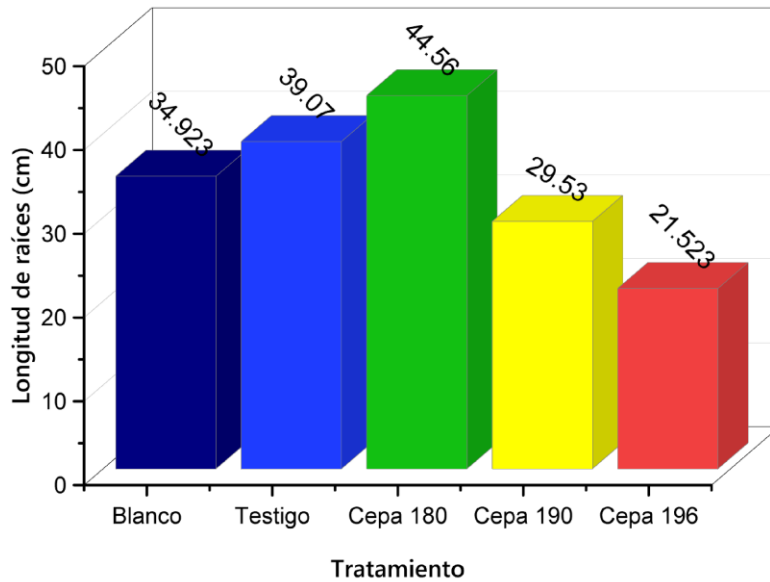
Gráfica 6. Altura de hojas vs Tiempo de Crecimiento de *Agave Salmiana* plantados en proporción 80% Jal - 20% Sustrato. Elaboración propia.

Ancho de Hojas de *Agave Salmiana* en Proporción 80% Jal 20% Sustrato



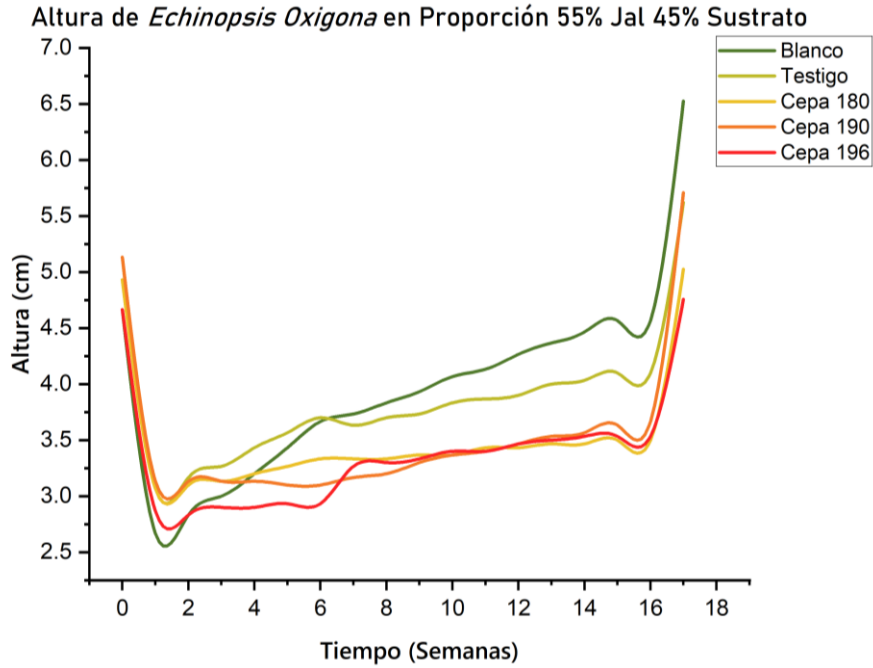
Gráfica 7. Ancho de hojas vs Tiempo de Crecimiento de *Agave Salmiana* plantados proporción 80% Jal - 20% Sustrato. Elaboración propia.

Longitud de raíces de *Agave Salmiana*
Proporción 80% Jal 20% Sustrato

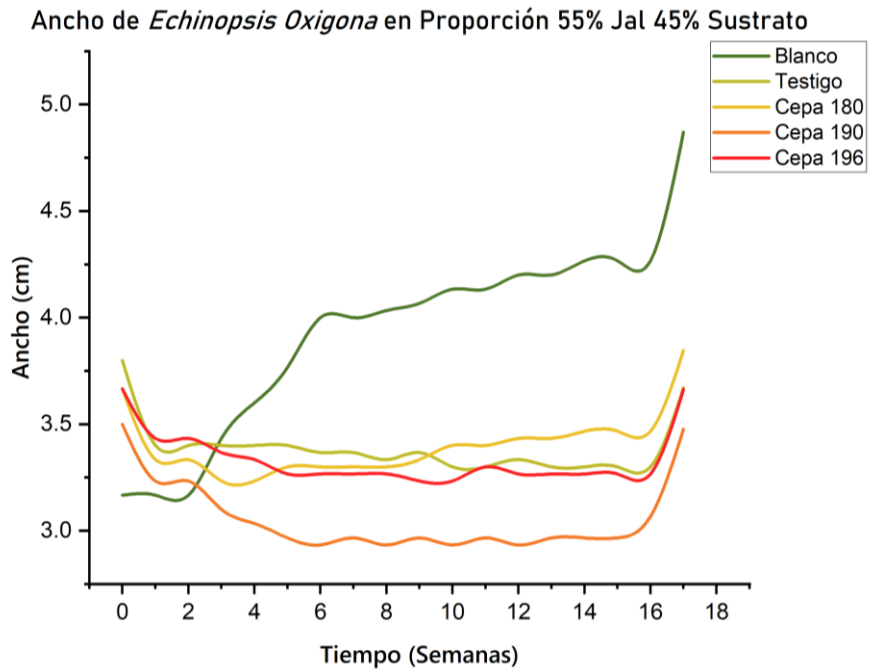


Gráfica 8. Longitud de las Raíces de *Agave Salmiana* en proporción 80% Jal - 20% Sustrato. Elaboración propia.

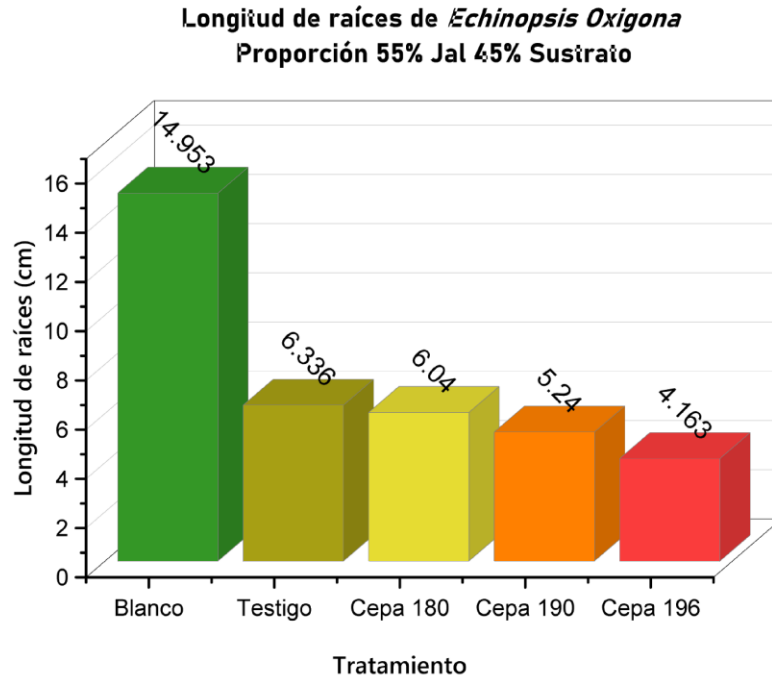
En seguida, se presentan gráficas de los parámetros de crecimiento de *Echinopsis Oxigona* en proporción 55% Jal - 45% Sustrato (Gráfica 9 – Gráfica 11) y 80% Jal - 20% Sustrato (Gráfica 12- Gráfica 14).



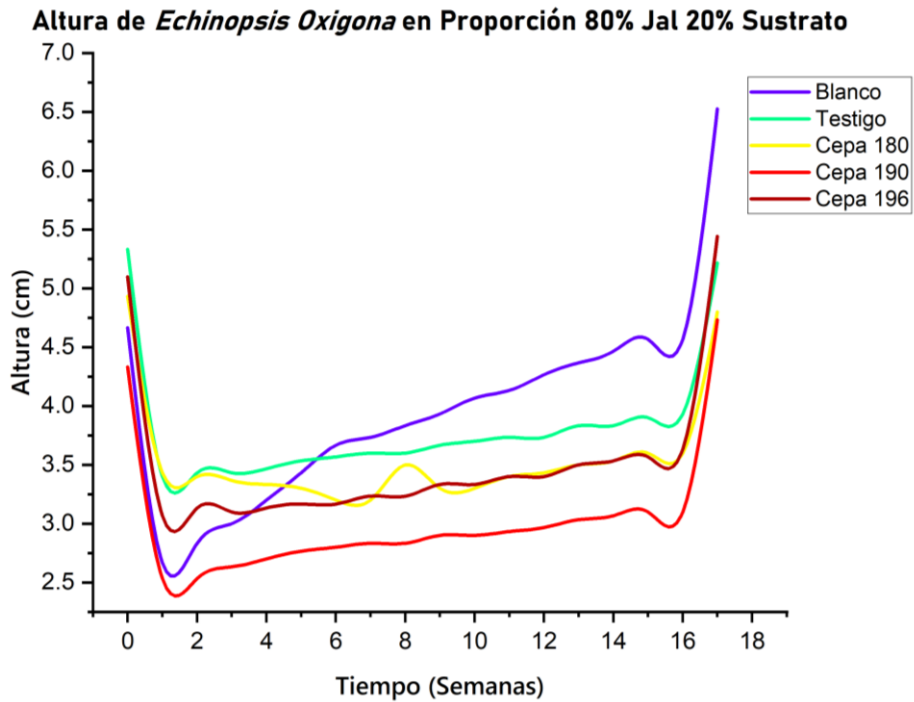
Gráfica 9. Altura de la planta vs Tiempo de Crecimiento de *Echinopsis Oxigona* en proporción 55% Jal - 45% Sustrato. Elaboración propia.



Gráfica 10. Ancho de la planta vs Tiempo de Crecimiento de *Echinopsis Oxigona* en proporción 55% Jal - 45% Sustrato. Elaboración propia.

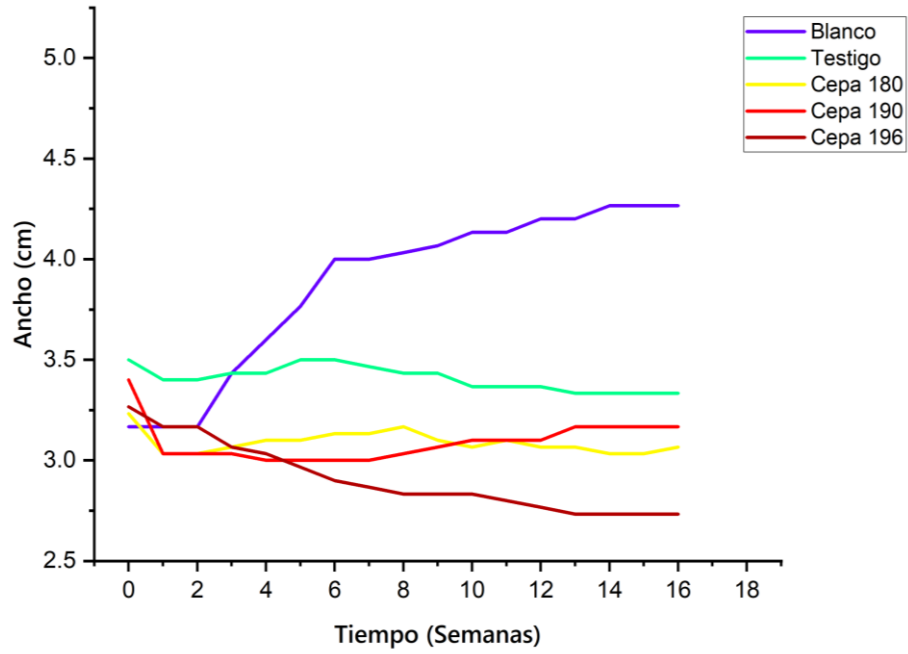


Gráfica 11. Longitud de las Raíces de *Echinopsis Oxigona* en proporción 55% Jal - 45% Sustrato. Elaboración propia.



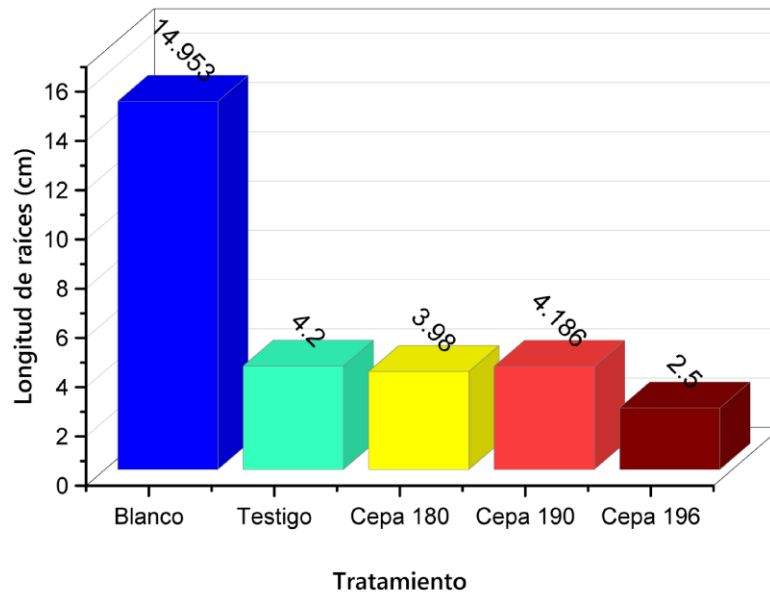
Gráfica 12. Altura de la planta vs Tiempo de Crecimiento de *Echinopsis Oxigona* en proporción 80% Jal - 20% Sustrato. Elaboración propia.

Ancho de *Echinopsis Oxigona* en Proporción 80% Jal 20% Sustrato



Gráfica 13. Ancho de la planta vs Tiempo de Crecimiento de *Echinopsis Oxigona* en proporción de 80% Jal -20% Sustrato. Elaboración propia.

**Longitud de raíces de *Echinopsis Oxigona*
Proporción 80% Jal 20% Sustrato**



Gráfica 14. Longitud de las Raíces de *Echinopsis Oxigona* en proporción 80% Jal - 20% Sustrato. Elaboración propia.

ANEXO 2: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE PRUEBAS DE TUKEY

Al demostrarse en los análisis ANOVA una diferencia significativa en los parámetros de crecimiento, se realizan pruebas de Tukey para saber cómo se relacionan las medias y verificar los resultados del ANOVA de cada uno de los parámetros.

Pruebas de Tukey de *Agave Salmiana*

Tabla 16. Prueba de Tukey de interacción en la variable altura de hoja. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Tratamiento	Medias	Grupos
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 190	18.33469	A
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 180	17.25771	B
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 190	17.01888	C
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 180	16.78292	D
80% Jal 20% Sustrato	Testigo	16.66917	E
55% Jal 45% Sustrato	Testigo	16.60042	F
0% Jal 100% Sustrato	Blanco	15.85198	G
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 196	15.77528	H
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 196	15.625	I

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la Tabla 16 se confirman los resultados en el parámetro de altura donde existe una diferencia significativa en los tratamientos con BPCV, destacando la cepa 190 en una concentración de 80% Jal 20% Sustrato con una media de 18.3346, por lo que el crecimiento de la altura de la hoja no depende de la concentración de jales.

Tabla 17. Prueba de Tukey de Concentración de Jales en la variable ancho de la hoja. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Medias	Grupos
0% Jal 100% Sustrato	6.78917	A
55% Jal 45% Sustrato	6.11776	B
80% Jal 20% Sustrato	5.64557	C

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la prueba de Tukey del ancho de la hoja (Tabla 17) se puede concluir que estadísticamente la Concentración de Jales presenta una diferencia significativa, en donde el crecimiento del ancho de la hoja de *Agave Salmiana* es afectado, por lo que en mayor concentración de Jales el ancho de la hoja es menor.

Tabla 18. Prueba de Tukey de Interacción en la variable ancho de la hoja. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Tratamiento	Medias	Grupos
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 190	6.91208	A
0% Jal 100% Sustrato	Blanco	6.78917	B
80% Jal 20% Sustrato	Testigo	6.51	C
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 180	6.37292	D
55% Jal 45% Sustrato	Testigo	6.06604	E
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 190	5.82229	F
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 196	5.17458	G
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 196	5.12	H
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 180	5.07542	I

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la interacción entre la proporción de jal-sustrato y las BPCV (Tabla 18), se observa una diferencia significativa de todos los tratamientos en el crecimiento del ancho de la hoja de planta, sobresaliendo el tratamiento con la cepa 190 en una concentración de 55% Jal 45% Sustrato con una media poblacional de 6.91208 de ancho de las hojas.

Tabla 19. Prueba de Tukey de Interacción en la variable longitud de raíces. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Tratamiento	Medias	Grupos
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 180	44.56	A
55% Jal 45% Sustrato	Testigo	44.47	B
80% Jal 20% Sustrato	Testigo	39.07	C
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 190	38.29333	D
0% Jal 100% Sustrato	Blanco	34.92333	E
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 196	30.41	F
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 190	29.53	G
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 180	26.7	H
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 196	21.52333	I

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferente

La prueba de Tukey (Tabla 19) en la longitud de raíces muestra una diferencia significativa estadísticamente. En los resultados los testigos presentan una media superior, ya que se registró la longitud de la raíz con más elongación, lo que implica que en una mayor elongación la planta busca nutrientes por lo que las raíces tienden a profundizar, sin embargo, en la presencia de BPCV las raíces no son las que tienen una elongación mayor, pero si una mayor cantidad de raíces cerca del tronco.

Tabla 20. Prueba de Tukey de Concentración de en la variable de Número de raíces. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Medias	Grupos
0% Jal 100% Sustrato	73.33333	A
55% Jal 45% Sustrato	61.66667	B
80% Jal 20% Sustrato	38.33333	C

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

La prueba de Tukey (Tabla 20) en la concentración de jales del número de raíces, es significativamente diferente, donde se puede inferir que en situación de estrés por EPT

presentes en jales mineros hay menor cantidad de raíces a una mayor cantidad de jales, sin embargo en presencia de BPCV (Tabla 21), *Agave Salmiana* tiende a desarrollar más raíces, mostrando una media poblacional superior en el sistema de fitorremediación asistida con BPCV con las cepa 190, 196 y 180, los cuales son significativamente diferentes, donde la cepa 190 promueve mayormente el desarrollo radicular de la especie con una media de 86.66 raíces en proporción 55% Jal – 45% Sustrato.

Tabla 21. Prueba de Tukey de Tratamientos en la variable de Número de raíces. Elaboración propia

Tratamiento	Medias	Grupos
Blanco	73.33333	A
Cepa 190	66.66666	B
Cepa 196	50.83333	C
Cepa 180	44.16667	D
Testigo	38.33333	E

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Tabla 22. Prueba de Tukey de Interacción en la variable de Número de raíces. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Tratamiento	Medias	Grupos
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 190	86.66667	A
0% Jal 100% Sustrato	Blanco	73.33333	B
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 196	60	C
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 180	53.33333	D
55% Jal 45% Sustrato	Testigo	46.66667	E
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 190	46.66667	F
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 196	41.66667	G
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 180	35	H
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 196	30	I

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Pruebas de Tukey de *Echinopsis Oxigona*

Tabla 23. Prueba de Tukey de Concentración de en la variable de Altura de *Echinopsis Oxigona*. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Medias	Grupos
0% Jal 100% Sustrato	3.99593	A
55% Jal 45% Sustrato	3.58403	B
80% Jal 20% Sustrato	3.48602	B

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

De acuerdo con la prueba de Tukey (Tabla 23), el blanco presenta estadísticamente una diferencia significativa respecto a ambas proporciones jal-sustrato, ya que los resultados en estas concentraciones son estadísticamente iguales. Por lo que se puede inferir que la presencia de EPT afecta el crecimiento de la altura de la especie, sin embargo, esta se adapta, de tal forma que la diferencia de las medias es mínima.

Tabla 24. Prueba de Tukey de Tratamientos en la variable de Altura de Echinopsis Oxigona. Elaboración propia

Tratamiento	Medias	Grupos
Blanco	3.99593	A
Testigo	3.85481	A B
Cepa 180	3.53222	A B C
Cepa 196	3.45926	B C
Cepa 190	3.2939	C

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

La prueba de Tukey (Tabla 24), confirma el resultado del ANOVA, ya que no hay diferencia significativa en la altura, puesto que estadísticamente presentan valores similares.

Tabla 25. Prueba de Tukey de Concentración de en la variable de Ancho de la planta de Echinopsis Oxigona. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Medias	Grupos
0% Jal 100%Sustrato	3.92981	A
55% Jal 45%Sustrato	3.29847	B
80% Jal 20% Sustrato	3.14102	C

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la prueba de Tukey (Tabla 25), la concentración presenta diferencia significativa en el ancho de la planta, por lo que se puede inferir que en la presencia de EPT en jales mineros el ancho de la planta es afectado por la alta toxicidad.

Tabla 26. Prueba de Tukey de Interacción en la variable de Ancho de la planta. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Tratamiento	Medias	Grupos
0% Jal 100% Sustrato	Blanco	3.92981	A
80% Jal 20%Sustrato	Testigo	3.41481	B
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 180	3.40259	C
55% Jal 45% Sustrato	Testigo	3.39093	D
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 196	3.33685	E
80% Jal 20%Sustrato	Cepa 190	3.11556	F
80% Jal 20%Sustrato	Cepa 180	3.10296	G
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 190	3.06352	H
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 196	2.93074	I

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

En la interacción entre la proporción jal-sustrato y las BPCV (Tabla 26) se observa una diferencia significativa, confirmando nuevamente que la presencia de jales mineros afecta el desarrollo del ancho de la planta, de tal manera que el crecimiento del ancho de la planta es lento.

Tabla 27. Prueba de Tukey de Concentración de en la variable de Longitud de Raíces de Echinopsis Oxigona. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Medias	Grupos
0% Jal 100%Sustrato	14.95333	A
55% Jal 45%Sustrato	5.445	B
80% Jal 20% Sustrato	3.71667	C

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

La prueba Tukey (Tabla 27), muestra que las medias poblacionales en la proporción jal-sustrato, la longitud de raíces son significativamente diferentes, donde se puede observar que la longitud de las raíces es afectada por la alta toxicidad de los jales, ya que estas tienden a ser más cortas, sin embargo, en respuesta de adaptación las raíces son más gruesas por lo que les permite profundizar y sobrevivir a estas condiciones.

Tabla 28. Prueba de Tukey de Interacción en la variable de Longitud de Raíces de *Echinopsis Oxigona*. Elaboración propia

Proporción Jal-Sustrato	Tratamiento	Medias	Grupos
0% Jal 100% Sustrato	Blanco	14.95333	A
55% Jal 45% Sustrato	Testigo	6.33667	B
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 180	6.04	C
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 190	5.24	D
80% Jal 20% Sustrato	Testigo	4.2	E
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 190	4.18667	F
55% Jal 45% Sustrato	Cepa 196	4.16333	G
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 180	3.98	H
80% Jal 20% Sustrato	Cepa 196	2.5	I

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

La prueba de Tukey de interacción (Tabla 28) muestra que las medias poblacionales son significativamente diferentes, donde se observa que, a una menor concentración de jal, las raíces tienden a tener una mayor elongación, además cabe destacar que visualmente las raíces tienden a tener la misma elongación y estas se presentan en una alta densidad en presencia de BPCV alrededor de la base del tallo de la planta.

REFERENCIAS

- Adewuyi, S. O., Anani, A., & Luxbacher, K. (2024). Advancing sustainable and circular mining through solid-liquid recovery of mine tailings. *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, 189, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.086>
- Aduvire O. (2006). *Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento*. España: Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Ahmad, P., Alam, P., Balawi, T. H., Altalayan, F. H., Ahanger, M. A., and Ashraf, M. (2020). Sodium nitroprusside (SNP) improves tolerance to arsenic (As) toxicity in *Vicia faba* through the modifications of biochemical attributes, antioxidants, ascorbate-glutathione cycle and glyoxalase cycle. *Chemosphere* 244:125480. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125480
- Akhtar N, Mannan MA. 2020. Mycoremediation: Expunging environmental pollutants. *Biotechnology Reports*. 26: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00452>
- Ali, H., Khan, E. y Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Álvaro F. (2020). Metales pesados y medio ambiente. Más Ciencia. Consultado en: <https://masciencia.wixsite.com/masciencia/post/metales-pesados-y-medio-ambiente>
- Ambientum (2024). Los metales pesados en el medio ambiente: Fuentes y consecuencias para la salud. Ambientum Portal Lider Medioambiente. Consultado en: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/atmosfera/los-metales-pesados-en-el-medio-ambiente-fuentes-y-consecuencias-para-la-salud.asp

- Antoniolidia. (2023). El impacto social de la minería: consecuencias y desafíos. Todo Ingenierías. Recuperado de: https://todoingenierias.com/el-impacto-social-de-la-mineria-consecuencias-y-desafios/#el_impacto_social_de_la_mineria_puede_afectar_a_las_comunidades_locales
- Azamar A., Téllez I., (2022). Minería en México: Panorama social, ambiental y económico. México. Recuperado de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD006871.pdf>
- Bautista-Cruz, Angélica, & Martínez-Gallegos, Verónica. (2020). Promoción del crecimiento de *Agave potatorum* Zucc. por bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 555-567. Epub 12 de enero de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.647>
- Belapurkar P., Dubey S., Kelotra S., (2023). Chapter 11 - Microbe-assisted heavy metal phytoremediation. Integrative Strategies for Bioremediation of Environmental Contaminants, Volume Two. Developments in Applied Microbiology and Biotechnology. Pages 187-197. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14013-6.00016-0>
- Bernal Figueroa, A. A. (2014). Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 5(2), 245-258. <https://doi.org/10.22490/21456453.1340>
- Castillo M., Yañez S. (2018). Fitorremediación de jales mineros asistida con Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. 9(22): 110 - 120
- Carpena, R. O., & Pilar Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*. Consultado en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/16683/1/eco.pdf>
- Cerillos G. (2021) Recuperación de cubierta vegetal y control de erosión por medio de técnicas de bioingeniería, maguey (*Agave Salmiana*) y nopal (*Opuntia Robusta*) en el parque ecológico Cubitos, Pachuca de Soto, Hidalgo. Tesis. UNAM.
- Chicaiza-Ortiz, C. D., Rivadeneira-Arias, V. C., Herrera-Feijoo, R. J., Andrade, J. C. (2023). *Biología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*. Editorial Grupo AEA.
- Clark, G. B., Hustrulid, W. A., & Mero, J. L. (2024, 22 abril). *Mining | Definition, History, Examples, Types, Effects, & facts*. Encyclopedia Britannica. Recuperado de: <https://www.britannica.com/technology/mining>.
- Clu-in. (s/f). *Fitotecnologías*. Clu-in.org. Consultado en: <https://clu-in.org/techfocus/default2.focus/sec/Phytotechnologies/cat/Overview/>
- Cognita Conecta (2024) Tipos de Biorremediación: In Situ vs Ex Situ. Consultado en: <https://cognitaconecta.com/tipos-de-biorremediacion-in-situ-vs-ex-situ/>
- CONABIO (2021). Maguey Pulquero *Agave salmiana*. iNaturalist Mexico. Consultado en: <https://mexico.inaturalist.org/taxa/204746-Agave-salmiana>
- Contreras Y. (2021). *Uso de plantas hiperacumuladoras en minería: conceptos y aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Consultado en: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79356/1017153992_2021.pdf?sequence=3
- Cordero J. (2015). Fitorremediación in situ para la recuperación de suelos contaminados por metales pesados (plomo y cadmio) y evaluación de selenio en la finca furatena alta en el municipio de Útica (Cundinamarca). Universidad Libre. Bogotá.
- Corrales-Lozada, M., Victoria L., Iglesias-Osores, S., & Carreño-Farfán, C. (2020). Potencialidades de bacterias promotoras del crecimiento vegetal, aisladas de *Portulaca oleracea* L. en suelos con salinidad. *Pastos y Forrajes*, 43(2), 93-101. Consultado en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942020000200093&lng=es&tlng=es.
- Cortinas De Nava, C. 2008. Manejo de los relaves o jales mineros. Instituto Nacional de Ecología (INE). Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas del INE.
- Cota-Ruiz, K., Núñez-Gastelúm, J. A., Delgado-Rios, M., & Martinez-Martinez, A. (2019). Biorremediación: actualidad de conceptos y aplicaciones. *Biocencia*, 21(1), 37-44. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=672971082005>

- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 33, 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Cruz Ruiz, E. 2017. Efecto del encalado, abonado y fertilización de jales mineros ácidos sobre la biodisponibilidad química y bioacumulación de Cu, Cd, Pd y Zn en *Festuca arundinacea*. Tesis de maestría en ciencias de la Tierra. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 97 pp.
- Csavina J., Field J., Taylor M. P., Gao S., Landázuri A., Betterton E. A. & Sáez A. E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, 433, 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013>
- da Silva-Rêgo, L. L., de Almeida, L. A., & Gasparotto, J. (2022). Toxicological effects of mining hazard elements. *Energy Geoscience*, 3(3), 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.03.003>
- de la Fuente, A. (s/f). La explotación de los hidrocarburos y los minerales en México: un análisis comparativo. Boell.org. Recuperado el 20 de mayo de 2024, de https://mx.boell.org/sites/default/files/estudio_aroa_de_la_fuente.pdf
- Del Rosario K. (2020). Actividad enzimática en procesos de fitorremediación de jales mineros asistida con bacterias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es.
- Denton B. 2007. Advances in phytoremediation of heavy metals using plant growth promoting bacteria and fungi. *MMG 445 Basic Biotechnology* 3: 1-5
- INECC (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos 2012, versión electrónica. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado en: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>.
- Deepika, Haritash, A.K. (2023). Phytoremediation potential of ornamental plants for heavy metal removal from contaminated soil: a critical review. *Hortic. Environ. Biotechnol.* **64**, 709–734. <https://doi.org/10.1007/s13580-023-00518-x>
- Dinu, C., Vasile, G.-G., Buleandra, M., Popa, D. E., Gheorghe, S., and Ungureanu, E.-M. (2020). Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in a mining-contaminated soil. *J. Soils Sediments* 20, 2141–2154. doi: 10.1007/s11368-019-02550-w
- DIRECTIVA 2006/21/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 15 de marzo de 2006 sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE.
- Ecoembes (2024). La fitorremediación y su impacto en la restauración ambiental. Consultado en: <https://reducereutilizarecicla.org/fitorremediacion/>
- EDU.LAT. (2019). Maguey pulquero: historia, características, hábitat, usos. Consultado en: <https://definicion.edu.lat/academia/4714FD132BD585BB871F3483FFF2FDA8.html>
- Elizondo C., Gutiérrez P. y Marín M. (s/f). *Zimapán, Historia de un Pueblo Minero*. Edu.mx. Recuperado de: <http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Zimapan-Historia-De-Un-Pueblo-Minero.pdf>
- EPA [Environmental Protection Agency], (2012). Guía del ciudadano sobre la biorremediación. Epa.gov. Consultado en: https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/epa-542-f-12-003s_guia_del_ciudadano_sobre_la_biorremediacion.pdf
- EPA [Environmental Protection Agency], (2000). Introduction to Phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio (EPA/600/R-99/107). <https://clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf>

- Esperanza. (2023). Beneficios de los cactus para restaurar suelos y retener agua. Todo sobre Cactus; Cactus en su mundo. Consultado en: <https://cactuslandia.net/cactus-columnares/beneficios-de-los-cactus-para-restaurar-suelos-y-retener-agua/>
- EU [European Union] (2018). Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Consultado en: <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/basel-convention-on-the-control-of-transboundary-movements-of-hazardous-wastes-and-their-disposal.html>
- FAO (2024). Portal de Suelos de la FAO. Consultado en: <https://www.fao.org/soils-portal/resources/es/>
- Flores, A. (2023). El impacto ambiental de la minería en los ecosistemas: ¿Cuál es su alcance? Ecosistemas. Consultado en: https://ecosistemas.win/cual-es-el-impacto-ambiental-de-la-mineria-en-los-ecosistemas/?expand_article=1
- Gao X, Jiang L, Mao Y, Yao B, Jiang P, Bing H. (2021). Progress, Challenges, and Perspectives of Bioleaching for Recovering Heavy Metals from Mine Tailings. Adsorption Science & Technology. doi:10.1155/2021/9941979
- García Aguirre, F., (2012). La minería en México. Espacios para el capital a cielo abierto. Theomai, (25), 128-136. ISSN: 1666-2830
- García-Astillero, A. (2018) Contaminación por metales pesados en el agua. Ecología verde. Consultado en: <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-por-metales-pesados-en-el-agua-1452.html>
- García I. & Dorronsoro C. 2002. Contaminación por metales pesados. Departamento de edafología y química agrícola de España.
- Gautam, V., Sharma, P., Bakshi, P., Arora, S., Bhardwaj, R., Paray, B. A., et al. (2020). Effect of *Rhododendron arboreum* leaf extract on the antioxidant defense system against chromium (VI) stress in *Vigna radiata* plants. *Plan. Theory* 9:164. doi: 10.3390/plants9020164
- Gavilán-García, Irma C., Ladino, Luis A., Franco, Eliacim, & Juárez, Javier. (2020). Determinación de factores involucrados en la valoración del riesgo potencial asociado a la dispersión atmosférica de jales mineros y a su ingestión. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(1), 127-138. <https://doi.org/10.20937/rica.2020.36.53384>
- Gill, R. A., Ahmar, S., Ali, B., Saleem, M. H., Khan, M. U., Zhou, W., et al. (2021). The role of membrane transporters in plant growth and development, and abiotic stress tolerance. *Int. J. Mol. Sci.* 22:12792. doi: 10.3390/ijms222312792
- Glick B.R. 2010. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances* 28: 367-374
- Greenfield, E. (2023). Impacto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. Sigma Earth. Consultado en: <https://sigmaearth.com/es/Impacto-de-los-metales-pesados-%E2%80%8B%E2%80%8Ben-el-medio-ambiente-y-la-salud-humana/>
- Goicochea-Trelles, P. A. ., & Garcia-Lopez, Y. J. . (2022). Fitorremediación para recuperar suelos contaminados por metales pesados: discusión de revisión sistemática. *Agroindustrial Science*, 12(3), 293-303. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.03.08>
- González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R. (2017). Fitorremediación asistida por microorganismos con énfasis en hongos arbusculares. *Agroproductividad*: Vol. 10, Núm. 4, abril. 2017. pp: 28-33.
- Green, I. D., Ginige, T. A., Demir, M., & Van Calster, P. (2021). Accumulation of potentially toxic elements in agricultural soils. *Environmental Loss and Damage in a Comparative Law Perspective: Attribution, Liability, Compensation and Restoration*, (6), 87-110.
- Green, J. (2023). A complete care guide for the Easter Lily cactus. Positivebloom. <https://positivebloom.com/easter-lily-cactus/>
- Gualoto T. y Oña M., (2022). *La Biodiversidad al Servicio del Ambiente*. Universidad Técnica del Norte. Ecuador. Recuperado de: <https://repositorio.utn.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12831/1/libro%20biorremediacion%CC%81n%20final%20COMPRIMIDO.pdf>

- Gutiérrez, M.E. y M. Moreno. 1997. Los residuos en la minería mexicana. INE, México.
- Gómez M. (2015). *Historia de la fitorremediación*. Prezi.com. Recuperado el de: https://prezi.com/0-ox5ces5_md/historia-de-la-fitorremediacion/
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Klalid, R. & Ahmed, I. (2010). Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Ann Microbiol* **60**, 579–598. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0117-1>
- Hernández M. (2005) “*Diagnóstico del impacto ambiental de jales mineros sobre terrenos del municipio el oro de hidalgo, estado de México*”. (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México. Consultado en: https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/572434/DocsTec_2802.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Herrera J. (2017). Introducción a la Minería. (2 ed.) Vol. I: Conceptos, tecnologías y procesos. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.63396>.
- INEGI (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010, Zimapán Hidalgo. Consultado en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/13/13084.pdf
- Jamele A. (2022). *Cáñamo en Chernobyl: cómo se trata la contaminación a 36 años de la catástrofe medio ambiental*. Revista THC. Consultado en: <https://revistathc.com/2022/04/26/canamo-en-chernobyl/>
- Jambor J.L. 1994, Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products, en Jambor J.L., Blowes D.W. (eds.) *Environmental geochemistry of sulfide mine-wastes: Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook* , 22, 59-102.
- Jamieson, H.E. 2011, *Geochemistry and mineralogy of solid mine waste: essential knowledge for predicting environmental impact: Elements*, 7, 381-386.
- Ke, W., Li, C., Zhu, F., Luo, X., Feng, J., Li, X., Jiang, Y., Wu, C., Hartley, W., & Xue, S. (2023). Effect of potentially toxic elements on soil multifunctionality at a lead smelting site. *Journal of Hazardous Materials*, 454(131525), 131525. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131525>
- Kidd P., Barcelo J., Bernal P., Navari-Izzo F., Poschenreder C., Shilev S., Clemente R., Monterroso C. 2009. Trace element behavior at the root–soil interface: implications in phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany* 67: 243-259
- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Ali, S., Hassan, M. J., Brestic, M., Zhang, X., & Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 222(112510), 112510. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112510>
- Leung M. 2004. Bioremediation: Techniques for Cleaning up a mess. *BioTeach Journal*, 2, 18-22. Recuperado de <https://www.bioteach.ubc.ca/Journal/V02I01/bioremediation.pdf>
- Kumar, V., Singh, J., and Chopra, A. K. (2018). Assessment of plant growth attributes, bioaccumulation, enrichment, and translocation of heavy metals in water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) grown in sugar mill effluent. *Int. J. Phytoremediation* 20, 507–521. doi: 10.1080/15226514.2017.1393391
- Lemus-Díaz, P. G., Yadira Belmonte-Izquierdo, & González-Hernández, J. C. (2024). La importancia del metabolismo CAM en la familia Agavaceae. *Milenaria, Ciencia Y Arte*, (23), 39–42. <https://doi.org/10.35830/mcya.vi23.375>
- Llugany, M., Tolrà, R., Poschnrieder, C., & Barceló, J. (2007). *Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre?* Ecosistemas. Universidad Autónoma de Barcelona. Consultado en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7664/1/ECO_16%282%29_02.pdf
- Londoño-Franco, Luis Fernando, Londoño-Muñoz, Paula Tatiana, & Muñoz-García, Fabián Gerardo. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Loredó-Osti, C., López-Reyes, L., & Espinosa-Victoria, D. (2004). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas: Una revisión. *Terra Latinoamericana*, 22(2), 225-239.
- Loyde De La Cruz, Luis Antonio, González Méndez, Blanca, Cruz Avalos, Ana Martha, & Loredó Portales, René. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede

- remediar. *Epistemos* (Sonora), 16(33), 93-98. Epub 19 de mayo de 2023. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v16i33.228>
- Macedo H, Medina Susan (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por relaves mineros en zonas áridas mediante *Melocactus peruvianus* y *Haageocereus acranthus*. DOI: <https://doi.org/10.21142/tl.2022.2227>
 - Macedo A., Villegas I., Carrillo R., Torres R. (s/f). Contaminación por metales pesados de aguas superficiales en la microcuenca de Zimapán, Hidalgo. Ecorfan.org. Consultado en: https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Quimica%20y%20Agronomia%20T-I/HCQA_TI_2.pdf
 - Mani D. & Kumar C. (2014). Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11, 843–872. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0299-8>
 - Márquez R., Martínez C., & Osorio M. (2022). Adoptar los objetivos de la restauración ecológica como meta crucial al mitigar desechos mineros: una propuesta metodológica. *Acta botanica mexicana*, 129. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2019>
 - MBGS. (s. f.). ¿Qué son los hidrocarburos en la minería? Consultado en: <https://www.mbgs.es/queson-los-hidrocarburos-en-la-mineria/#:~:text=En%20resumen%2C%20los%20hidrocarburos%20en%20la%20miner%C3%ADa%20son,de%20productos%20qu%C3%ADmicos%20necesarios%20en%20el%20proceso%20minero.>
 - Medel Reyes, A., Ramos Gomez, S., Avelar González, F. J., Mora Tovar, L. A., & Rodríguez Valadez, F. (2008). Caracterización de Jales Mineros y evaluación de su peligrosidad con base en su potencial de lixiviación. *Conciencia Tecnológica*, (35), 32-35.
 - Medel A. (2009) Caracterización fisicoquímica de jales mineros y evaluación de biosólidos como propuesta de remediación. Tesis de maestría. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C. México.
 - Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2021). Fitorremediación: alternativa biotecnológica para recuperar suelos contaminados con DDT. Una revisión. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 24, e326. Epub 15 de noviembre de 2021. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.326>
 - Mendoza Hernández, J., Vázquez Delgado, O., & Castillo Morales, M. (2019). Phytoremediation of mine tailings by *Brassica juncea* inoculated with plant growth-promoting bacteria. *Microbiological Research*, 126-308.
 - Meneses J. (Productor). (2015). *Minería en Hidalgo*. Consultado en: <https://www.youtube.com/watch?v=CFsr8uwK-xM>
 - Molina I. (2018) Identificación y análisis de agentes lixiviantes no convencionales para la recuperación de elementos de valor desde minerales, concentrados y escorias de fundición. Universidad de Concepción. Consultado en: <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/a874854d-563b-46e3-909e-2c47474d93db/content>
 - Montes C. (2023) Gestión ambiental en minería: capítulo biodiversidad. Chile. Consultado en: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Gesti%C3%B3n%20ambiental%20en%20miner%C3%ADa%20-%20Cap%C3%ADtulo%20Biodiversidad.pdf>
 - Montes J. (2016). Efecto de los Metales Pesados en Suelo de Jales Mineros de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí: REPOSITORIO NACIONAL CONACYT.
 - Moreno T, Téllez J y Monroy M. (2012). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(3), 203-218. Recuperado en 03 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300003&lng=es&tlng=es.
 - Bonilla Buitrago, R. González de Bashan, L. E., & Pedraza, R. O. (2021). Rol de las bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible. *AGROSAVIA*. Recuperado de: <https://alaronline.org/wp-content/uploads/2024/05/Libro-Biofertilizantes.pdf>

- Moreno Tovar, R., Barbanson, L., & Coreño Alonso, O. (2009). Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. *Minería y Geología*, 25(2), 1-31.
- Morgan, H. (2021). *Echinopsis oxygona Easter Lily Cactus Care Guide*. The Garden Style. <https://www.thegardenstyle.com/succulents/echinopsis-oxygona-easter-lily-cactus-guide/>
- Navarro-Aviñó J.P., Aguilar Alonso I., López-Moya J.R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista científica y técnicas de ecología y medio ambiente. Ecosistemas*. Consultado en: <https://core.ac.uk/download/pdf/16361067.pdf>
- Nakbanpote W, Kutrasaeng N, Jitto P, Vara Prasad M. N. (2024) Chapter 9 - Potential of ornamental plants for phytoremediation and income generation. *Bioremediation and Bioeconomy (Second Edition). A Circular Economy Approach*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16120-9.00017-0>
- Neesse, T. (2013). Selective attachment processes in ancient gold ore beneficiation. *Minerals Engineering*, 58, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.009>
- Nedaee Ziabari, S. Z., Sedaghathoor, S., Kaviani, B., & Baniasad, M. (2024). Phytoremediation ability of three succulent ornamental plants; cactus (*Opuntia humifusa*), kalanchoe (*Kalanchoe blossfeldiana*) and bryophyllum (*Bryophyllum delagoensis*) under heavy metals pollution. *The Science of the Total Environment*, 947(174579), 174579. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174579>
- Nieder, R. & Benbi, D. (2024). Potentially toxic elements in the environment – a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures. *Reviews on Environmental Health*, 39(3), 561-575. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0161>
- Núñez R., Meas Y., Ortega R., Olgún E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. México. Ciencia – Academia Mexicana de Ciencias. Consultado en: <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/fitorremediacion-fundamentos-y-aplicaciones>
- Ojeda Barrios D. L. y Morales Maldonado E. R. (2024). El maguey pulquero: una fuente ancestral de alimento. *Elementos* 133. 97-10
- Olivera B., de la Fuente A., Llano M., Benumea I, Sandoval A., Terry W. (2018) Anuario 2017. Las actividades extractivas en México: minería e hidrocarburos hacia el fin del sexenio. México. Fundar, Centro de Análisis e Investigación. Consultado en: <https://fundar.org.mx/mexico/pdf/AnuarioExtractivas2017.pdf>
- Outletminero (2020) *¿Cuál es la importancia de la minería en México?* Recuperado de: <https://outletminero.org/cual-es-la-importancia-de-la-mineria-en-mexico/>
- Outletminero (2024). *La minería en México: un sector clave para la economía*. Recuperado de: <https://outletminero.org/la-mineria-en-mexico-un-sector-clave-para-la-economia/>
- Palacio de Minería. (Productor). (2021). *Las minas de Zimapán/el palacio en un clic/palacio de minería*. Consultado en: <https://www.youtube.com/watch?v=0E0xQRUdEzk>
- Pardo, S., Mazo, D. y Rojas, D. (2021). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: filogenia, microbioma, y perspectivas. *Sistemas de Agricultura Sostenible*. (pp.372) Edition: 1. Chapter: 2
- Paredes-Vilca, O. J., Jiménez Díaz, L., Dávila García, J., & Apaza Cruz, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. *Revista De Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 26(1), 56-66. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.594>
- Parul Sharma, & Sonali Pandey. (2014). "Status of Phytoremediation in World Scenario." *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, vol. 2, no. 4: 178-191. doi: 10.12691/ijebb-2-4-5.
- Pedrosa M. P. (2024). Climate Change and Aquatic Phytoremediation of Contaminants: Exploring the Future of Contaminant Removal. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 2024, 93(9), 2127-2147. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.056360>
- Perales Aguilar L., Santos Díaz M. S., Gómez Aguirre Y. A., Ramos Gómez M.S., & Pérez Molphe Balch E. (2020). Análisis in vitro de la acumulación de metales pesados en plantas de la familia Asparagaceae tolerantes a la baja disponibilidad de agua. *Nova scientia*, 12(24)Epub 02 de julio de 2020. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2081>

- Perea-Vélez Y.S., Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A. (2017). Fitorremediación asistida por microorganismos: énfasis en bacterias promotoras del crecimiento de plantas. *Agroproductividad*: Vol. 10, Núm. 4, abril. 2017. pp: 34-40.
- Pin A.B. & Simon J (2004). *Guía ilustrada de los cactus del Paraguay*. Paraguay. GRdB.
- Plants of the World. (s/f) *Echinopsis oxygona*. Consultado en: <https://powo.science.kew.org/taxon/132749-1>
- Planeta-Tierra (2019) Causas y efectos de la minería en la salud humana y el medio ambiente. Consultado en: <https://planeta-tierra.info/energia/causas-y-efectos-de-la-mineria-en-la-salud-humana-y-el-medio-ambiente/>
- Polo Bravo, C., & Sulca Quispe, L. (2019). Metales pesados: fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. *Ciencias*, 2(1), 20–36. <https://doi.org/10.33326/27066320.2018.1.842>
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., & Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Ramos M., Avelar, J., Medel-Reyes, A., Yamamoto, L., Godinez, L., Ramirez, M., Guerra, R., & Rodríguez, F. (2012). Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 49–59. Consultado en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000100005
- Ramírez-Ramírez AA, Zurita-Martínez F, Tejeda-Ortega A, Valencia-Botín AJ. 2024. Micorremediación: una forma de eliminar contaminantes del ambiente. *Revista Ciencia y Naturaleza* (1114).
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
- Rajkumar M., Sandhya S., Prasad M., Freitas H. 2012. Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology Advances* 30: 1562-1574.
- Rayu, S., Karpouzias, D.G. & Singh, B.K. (2012). Emerging technologies in bioremediation: constraints and opportunities. *Biodegradation* 23, 917–926. <https://doi.org/10.1007/s10532-012-9576-3>
- Remtavarez, 2010. *La biorremediación puede ser útil para la degradación de algunos contaminantes*. El Agua. Consultado en: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/03/22/131435>
- Reeves, R D. (2006). Chapter 2 hyperaccumulation of trace elements by plants 2. Historical records of metal-accumulating plants. 25-52.
- Riquezas Subterráneas. (2023). Minería y biodiversidad local: Impactos en comunidades. <https://mineriamoderna.net/mineria-social/mineria-su-impacto-diversidad-biologica-comunidades-locales/#cual-es-el-impacto-de-la-mineria-en-la-diversidad-biologica>
- Rivera Castelo, J. A. 2009. Diseño geotécnico para estabilización del depósito de jales mineros (Presa I), en Nacozari de García, Sonora, México. Tesis de Ingeniería Geológica. División de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Sonora. Hermosillo, México. 122 pp.
- Robles-Martínez María de Lourdes, Celerino Robles, Facundo Rivera-Becerril, y Pliego-Marín Lina. 2018. «Inoculación Con Consorcios Nativos De Hongos De Micorriza Arbuscular En Agave Angustifolia Haw». *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, n.º 6 (junio). México, ME:1231-40. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1286>.
- Rossiter, D. G. 2007. Classification of Urban and Industrial Soils in the 7(2): 96-100. DOI: <https://doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Secretaría de economía. (2024). Minería. El portal único de gobierno. Recuperado de: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>
- Secretaría de Planeación Desarrollo Regional y Metropolitano, Gobierno del Estado de Hidalgo. *Enciclopedia de Los Municipios de Hidalgo HIDALGO*. 2011, Consultado en: docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Zimapan-Enciclopedia-De-Los-Municipios-Del-Estado-De-Hidalgo.pdf.

- SEMARNAT [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales] (2015). Convenio de Basilea. Gobierno de México. Consultado en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convenio-de-basilea>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2018). Maguey pulquero: el estado de Hidalgo destacó en 2017 con 69.6% de la producción nacional. Consultado en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/maguey-pulquero?idiom=es>
- Servicio Geológico Mexicano (2017). *Explotación minera*. Consultado en: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera.html
- Servicio Geológico Mexicano (2011). *Panorama Minero del estado de Hidalgo*. Consultado en: <http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Hidalgo-Panorama-Minero.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano (2019). Información ciudadana sobre jales. Consultado en: <https://www.gob.mx/sgm/articulos/informacion-ciudadana-sobre-jales?idiom=es#:~:text=Los%20jales%20son%20los%20apilamientos%20de%20material%20molido,sido%20extra%C3%ADdos%20de%20las%20rocas%20que%20los%20contienen>.
- SEMARNAT (2004). Información proporcionada por la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. INE, México.
- Shehata, S.M., Badawy, R.K. & Aboulsoud, Y.I.E. (2019). Phytoremediation of some heavy metals in contaminated soil. *Bull Natl Res Cent* 43, 189. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0214-7>
- Shamim, S. (2018). Biosorption of heavy metals. *Biosorption* 2, 21–49. doi: 10.5772/intechopen.72099
- Szykowska, M. I., Pawlaczyk, A. y Maćkiewicz, E. (2018). Bioaccumulation and biomagnification of trace elements in the environment. *Recent advances in trace elements*, 251-276.
- Suárez P & Reyes R. (2002). La incorporación de metales pesados en las bacterias y su importancia para el ambiente. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Interciencia* 27(4):160-164.
- UNEP [United Nations Environment Programme]. (2020). Revisión Global de Relaves. Consultado en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/video/revision-global-de-relaves>
- Universidad Abierta y a Distancia de México (UnADM), s/f. *Introducción a la biorremediación*. Recuperado de: https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSBA/BLOQUE2/BI/07/BBRN/unidad_01/descargables/BBRN_U1_Contenido.pdf
- Usman, K., Abu-Dieyeh, M. H., Zouari, N., and Al-Ghouti, M. A. (2020). Lead (Pb) bioaccumulation and antioxidative responses in *Tetraena qataranse*. *Sci. Rep.* 10, 1–10. doi: 10.1038/s41598-020-73621-z
- Todoingenierías. (2023). El impacto de la minería en la calidad del suelo y sus consecuencias. Consultado en: <https://todoingenierias.com/el-impacto-de-la-mineria-en-la-calidad-del-suelo-y-sus-consecuencias/>
- Torres Rodríguez, D., (2003). El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Ecosistemas*, XII(2), 1-5.
- Trujillo Peralta, F. A., López Avilés, G., Mondragón Ca marillo, L., & Calderón Alvarado, K. del C. (2023). Bacterias tolerantes y resistentes a los metales pesados en el ambiente. *EPISTEMUS*, 17(34). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.287>
- Vázquez-Alonso MT, Bye R, López-Mata L, Pulido-Sala MTP, Mc Clung de Tapia E y Koch SD (2014). Etnobotánica de la cultura Teo tihuacana. *Botanical Sciences*, 92(4):563-574.
- Verde Suculenta. (2021). *Echinopsis oxygona* o erizo de mar. Consultado en: <https://verdesuculenta.net/echinopsis-oxygona-cactus-erizo-de-mar/>
- Veolia water technologies (2024). Tecnología Avanzada para el Tratamiento de Metales en Embalses de Jales Mineros. Consultado en: <https://golatam.veoliawatertechnologies.com/es/blog/tecnologia-avanzada-para-el-tratamiento-de-metales-en-embalses-de-jales-mineros>
- Vick, S. G. 1990. *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*. Segunda edición. BiTech Publishers LTD. Vancouver, B.C., Canada. 369 pp. DOI: <https://doi.org/10.14288/1.0394902>

- Villiers, F., Ducruix, C., Hugouvieux, V., Jarno, N., Ezan, E., Garin, J., Junot, C., & Bourguignon, J. (2011). Investigating the plant response to cadmium exposure by proteomic and metabolomic approaches. *Proteomics*, 11(9), 1650–1663. <https://doi.org/10.1002/pmic.201000645>
- Volke T. & Velasco J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT. México.
- Wang, C., Harbottle, D., Liu, Q., & Xu, Z. (2014). Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering*, 58, 113–131. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.018>
- Wong M.H. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*. 6: 775-780.
- Wuana, R.A., Okieimen, F.E. & Imborvungu, J.A. (2010). Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 7, 485–496. <https://doi.org/10.1007/BF03326158>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Jeevanantham, S., & Saravanan, R. (2022). A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 301(119035), 119035. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119035>
- Yélamos, C. (2021). Análisis de la transferencia suelo-planta de elementos potencialmente tóxicos en dos especies vegetales de las Minas de Lousal (Portugal). Universidad Complutense Madrid. España. URI: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/88318>
- Zhang, X., Xia, H., Li, Z., Zhuang, P., & Gao, B. (2010). Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. *Bioresource Technology*, 101(6), 2063–2066. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.065>
- Zitácuaro-Contreras I, Marín-Muñiz J. L., Celis Pérez M. C., Vidal Alvarez M, León Estrada X. A., Zamora Castro S. A. (2022) Vegetación ornamental utilizada en fitorremediación y sus potencialidades ambientales, económicas y sociales. *Journal of Basic Sciences*, Vol. 8 (23), pp. 133-145. ISSN: 2448-4997