

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA
UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO



**“EVALUACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO DE ESPECIES
LEGUMINOSAS NATIVAS DE LA REGIÓN CON SUSTRATO DE
JALES MINEROS ABANDONADOS, PROVENIENTE DEL
MUNICIPIO DE SAN PEDRO DE LA CUEVA, SONORA.”**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

GEOL. GABRIELA LUNA ANGULO

HERMOSILLO, SONORA.

SEPTIEMBRE, 2025

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO

MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES

T E S I S

**“EVALUACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO DE ESPECIES
LEGUMINOSAS NATIVAS DE LA REGIÓN CON SUSTRATO DE
JALES MINEROS ABANDONADOS, PROVENIENTE DEL
MUNICIPIO DE SAN PEDRO DE LA CUEVA, SONORA.”**

COMITÉ REVISOR

Director

Dr. Daniel Morales Romero

Secretario

Vocal

Dra. Carmen Isela Ortega Rosas

Dr. Octavio Cota Arriola

Hermosillo, Sonora.

SEPTIEMBRE, 2025.

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a mi asesor de tesis, **Dr. Daniel Morales Romero** por todo el apoyo y confianza depositada en mi desde el primer momento, por el aliento brindado durante todo el tiempo de este trabajo, pero sobre todo por creer en mi incluso más que yo misma, gracias por darme la oportunidad y cumplir uno de mis sueños de haber sido la Maestra Gabriela Luna ante sus alumnos (mis alumnos) y hacerme creer que soy capaz de lograr cosas de las que me creía incapaz, gracias por todo.

Agradezco a la **Dra. Carmen Isela Rosas Ortega** y al **Dr. Octavio Cota Arriola**, por aceptar ser parte de este comité de tesis, por compartirme sus conocimientos dentro y fuera del aula, por la disposición que tuvieron en todo momento de ayudarme e impulsarme a concluir esta bonita etapa académica, fue de gran valor para mi todos sus comentarios y críticas constructivas para poder ampliar mis conocimientos.

Al **Núcleo Académico Básico** de la **Maestría en Ciencias Ambientales**, principalmente a quienes fueron mis maestros de clase, al coordinador del programa el **Dr. Martín E. Cruz Campas**, a la responsable de investigación y posgrado la **Dra. Claudia Selene Cuevas Castro** por siempre asesorarnos y apoyarnos en trámites administrativos, al igual que a las instituciones y dependencias que me brindaron sus instalaciones y recursos económicos para la realización de mis estudios: **Universidad Estatal de Sonora (UES)**, **Universidad de Sonora (UNISON)** y al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCyT)**.

A las personas que me impulsaron a continuar mis estudios y aplicar para la maestría, **Alejandra Colunga Huerta**, gracias por ayudarme cuando te necesité, a la **M.I. Francisca Monge Amaya** y la **M.C.G. Alejandra Montijo González**, gracias por sus buenos consejos y ser parte de mis modelos a seguir de superación.

DEDICATORIA

A Dios

Por estar siempre a mi lado, guiando y abriendo puertas a donde quiera que vaya, por darme fortaleza de seguir en los momentos difíciles, por cumplir mis oraciones y nunca abandonarme a lo largo de esta etapa académica.

A mis padres, mis hermanos y familia

Gracias a mis padres **Juan G. Luna Luna** y **Sandra Angulo Rivera** por apoyarme en mis estudios, por estar presente siempre en mis logros, ayudarme cuando los he necesitado, ponerse felices porque cumplo mis metas y por hacerme una persona de bien. A mis hermanos **Susana Luna Angulo** y **Juan M. Luna Angulo** por conformar parte de nuestra familia y estar unidos en los buenos y malos momentos. Son mi motor para seguir siempre adelante y me da felicidad poder dedicar este logro tan importante a ustedes que tanto amo.

A mi pareja y familia

A quien ha sido mi pareja y compañero de vida por los últimos seis años, **Abiel I. Lara Sánchez**, gracias por ser mi sostén, por acompañarme en mis momentos más felices y también en los más difíciles, por ayudarme siempre que te necesitaba y ser parte del proceso de poder alcanzar mis metas. A la familia **Lara Sánchez** por siempre abrirme las puertas de su casa y adoptarme como una más de la familia, estaré siempre agradecidos con ustedes.

A mis amigos

A una de mis mejores amigas, **Maritza Martínez Munguía**, quien siempre ha estado para apoyarme y alentarme en mis logros, te agradezco cada palabra de aliento. A mis amigos y compañeros de la maestría, **Ana Lilia**, **Alicia**, **Jubal Gabriel** y **Oscar Armando**, gracias por su amistad y compañerismo dentro y fuera del aula, me encantó compartir esta etapa con ustedes. A mis amigas y amigos que siempre han estado al pendiente de mis logros y mandando sus mejores vibras y deseos para mí.

A mis abuelos

A las personas que extraño físicamente. A mi abuelo y abuelas, **Moisés Luna Álvarez, Ana Gloria Luna Navarro y Esperanza Rivera Ozuna**, sé que estarían felices de estar viendo crecer a sus hijos y nietos. Espero poder cumplir y hacer muchas cosas de bien aquí, aunque me hubiera encantado que estuvieran presentes viéndolo de cerca, también seré feliz de poder contarles todo lo que logré cuando sea nuestro reencuentro.

De Gabriela Luna Angulo para todos ustedes con mucho amor y cariño.

CONTENIDO

CONTENIDO	6
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
RESUMEN	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Proceso de Extracción Minera.	17
2.1.1 Etapas de la minería.	17
2.1.2 Proceso de Cierre de Mina	17
2.1.3 Estrategias del plan de cierre	18
2.2 La Biorremediación o Fitorremediación de Suelos Contaminados	19
2.2.1 La importancia de la recuperación de suelos	20
2.3 Importancia de especies leguminosas	21
2.3.1 Las leguminosas como plantas nodrizas	21
2.4 Especies Leguminosas Nativas de Sonora y su Importancia Ecológica	23
2.5 Sucesión Ecológica	24
2.6 Contaminantes que se Encuentran en los Jales Mineros y su Efecto en la Salud Poblacional y Vegetación.	24
2.7 Antecedentes de Trabajos en Minas	25
2.7.1 Minera aldeaña a San Pedro de la Cueva	25
2.7.2 Mina Pitalla	25
2.7.3 Santa Julia, Pachuca, Hidalgo	26
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	28

	7
4. JUSTIFICACIÓN	29
5. HIPÓTESIS	30
6. OBJETIVOS	31
7. METODOLOGÍA	32
7.1 Descripción del Área de Estudio	32
7.1.1 Fisiografía, Clima y Vegetación	33
7.2 Pruebas previas de quitosano	33
7.3 Descripción de Especies (fichas técnicas)	35
7.3.1 Parkinsonia aculeata	35
7.3.2 Parkinsonia microphylla	38
7.3.3 Parkinsonia praecox	41
7.3.4 Prosopis juliflora	44
7.4 Muestreo en Campo	47
7.4 Trabajo de Laboratorio	48
7.6 Prueba de Viabilidad de Semillas	51
7.7 Diseño Experimental de Germinación y Supervivencia (tabla de variables)	54
7.8 Análisis Geoquímico de los Suelos Contaminados	61
8. RESULTADOS	63
8.1 Viabilidad de las Semillas	63
8.2 Germinación de las Cuatro Especies de Estudio Bajo Diferentes Tratamientos.	64
8.3 Supervivencia de las Cuatro Especies Durante 4 Meses	70
8.4 Caracterización Geoquímica del Jal Minero	73
8.5 Análisis Estadístico de los Resultados	76
8.5.1 Germinación	76

	8
8.5.2 Supervivencia	77
9. DISCUSIONES	78
10. CONCLUSIONES	83
11. RECOMENDACIONES	86
12. LITERATURA CITADA	87
13. ANEXOS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de principales zonas de extracción de minerales en México. Fuente: INEGI. Censos Económicos, (2019).	13
Figura 2. Metodología para la ejecución de un cierre de minas sustentable.	18
Figura 3. Interacción de plantas nodriza. a) Cuando los efectos positivos son mayores que los negativos, se mejora la supervivencia o crecimiento de las plántulas, en comparación con las de espacios abiertos; b) el resultado contrario se da cuando los efectos negativos superan a los positivos.	23
Figura 4. Ubicación municipio de San Pedro de Cueva. Fuente: Tesis, Universidad de Sonora.	32
Figura 5. Estructura química del quitosano. Fuente: (Espinosa <i>et al</i> , 2020).	34
Figura 6. Flores, hojas, vainas y fruto de <i>Parkinsonia aculeata</i> . Fuente: Imagen propia.	37
Figura 7. Flores, hojas, vainas y fruto de <i>Parkinsonia microphylla</i> . Fuente: Imagen propia.	40
Figura 8. Flores, hojas, vainas y fruto de <i>Parkinsonia praecox</i> .	43
Figura 9. Flores, hojas, vainas y fruto de <i>Prosopis juliflora</i> . Fuente: Imagen propia.	46
Figura 10. Recolección de vainas en Centro Ecológico.	47
Figura 11. Retiro de vaina para recolectar semillas.	49
Figura 12. Semillas y vainas invadidas por insectos.	49
Figura 13. Escarificación de semillas de Palo verde y Mezquite.	50
Figura 14. Prueba de viabilidad de cada especie.	52
Figura 15. Realización de mezcla de quitosano.	56
Figura 16. Montaje de tratamientos experimentales.	59
Figura 17. Montaje de tratamientos experimentales.	60
Figura 18. Proceso de tamizaje con los tamices respectivos.	61
Figura 19. Muestras del sustrato contaminado.	62
Figura 20. Tinción de las semillas en viabilidad.	63
Figura 21. Germinación para <i>Parkinsonia aculeata</i> . Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q).	65

Figura 22. Germinación para <i>Parkinsonia microphylla</i> . Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q).	66
Figura 23. Germinación para <i>Parkinsonia praecox</i> . Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q).	67
Figura 24. Germinación para <i>Prosopis juliflora</i> . Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q).	68
Figura 25. Germinación en porcentaje para las especies <i>Parkinsonia aculeata</i> , <i>Parkinsonia microphylla</i> , <i>Parkinsonia praecox</i> y <i>Prosopis juliflora</i> en cada uno de los tratamientos. Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q).	76
Figura 26. Monitoreo de crecimiento de vainas Palo verde.	92
Figura 27. Monitoreo de crecimiento de vainas de mezquite.	93
Figura 28. Escarificación manual de semillas.	94
Figura 29. Semilla escarificada manualmente.	95
Figura 30. Resultado de prueba de viabilidad.	96
Figura 31. Crecimiento de palo verde en tratamiento suelo de jardín.	97
Figura 31. Crecimiento de mezquite en tratamiento suelo de jardín.	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales mecanismos de acción de las plantas nodriza.	22
Tabla 2. Pruebas de concentraciones utilizadas para el quitosano.	34
Tabla 3. Taxonomía desglosada de <i>Parkinsonia aculeata</i> .	35
Tabla 4. Ficha técnica de <i>Parkinsonia aculeata</i> .	36
Tabla 5. Taxonomía desglosada de <i>Parkinsonia microphylla</i> .	38
Tabla 6. Ficha técnica de <i>Parkinsonia microphylla</i> .	39
Tabla 7. Taxonomía desglosada de <i>Parkinsonia praecox</i> .	41
Tabla 8. Ficha técnica de <i>Parkinsonia praecox</i> .	42
Tabla 9. Taxonomía desglosada de <i>Prosopis juliflora</i> .	44
Tabla 10. Ficha técnica de <i>Prosopis juliflora</i> .	45
Tabla 11. Método utilizado para prueba de viabilidad en las distintas especies.	53
Tabla 12. Variables del diseño experimental.	54
Tabla 13. Concentraciones utilizadas para el quitosano.	55
Tabla 14. Elaboración de diseños experimentales.	57
Tabla 15. Resultados de prueba de viabilidad en semillas.	63
Tabla 16. Sintética de germinación en porcentajes.	69
Tabla 17. Porcentaje de supervivencia durante el primer mes.	70
Tabla 18. Porcentaje de supervivencia durante el segundo mes.	71
Tabla 19. Porcentaje de supervivencia durante el tercer mes.	72
Tabla 20. Porcentaje de supervivencia durante el cuarto mes.	73
Tabla 21. Elementos mayores presentes en jal minero.	74
Tabla 22. Elementos menores y trazas presentes en jal minero.	74
Tabla 23. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie <i>Parkinsonia aculeata</i> .	83
Tabla 24. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie <i>Parkinsonia microphylla</i> .	84
Tabla 25. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie <i>Parkinsonia praecox</i> .	84
Tabla 26. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie <i>Prosopis juliflora</i> .	85

RESUMEN

El proyecto constó de la recuperación ecológica de suelos contaminados, específicamente de jales mineros abandonados, en el cual se utilizaron diferentes tratamientos que ayuden a las distintas especies de plantas a tener un mayor rendimiento en sus diferentes etapas de vida. El objetivo principal de la investigación fue poder evaluar la germinación y establecimiento de distintas especies leguminosas nativas de la región de Sonora, midiendo también la tasa de supervivencia que tienen en el sustrato de jales mineros los cuales fueron caracterizados de forma general. Se usaron varias técnicas y equipos para llevar a cabo la metodología, entre ellas está el equipo de inflorescencia de rayos X Niton FXL FM-XRF Analyzer, tamizador mecánico y el uso de artefactos de laboratorio para el análisis de suelo. En laboratorio se hizo una experimentación para analizar la germinación de de las especies en distintos tratamientos. Básicamente se trató de poder determinar cuáles son las especies que mejor germinaron, adaptaron y sobrevivieron al sustrato de jales mineros abandonados y en qué condiciones tuvieron su mejor prospección. La hipótesis fue que dependiendo de los diferentes tratamientos que tuvimos, las especies se van a comportar de distinta manera, pero con resultados más favorables en los tratamientos que se emplearon a comparación del control. Lo cual se comprobó con los resultados ya que dentro de los tratamientos unos tuvieron mejor potencial que otros, ya que como la literatura nos dice el biochar y quitosano tiene muchas propiedades benéficas para la supervivencia de plantas, sin embargo, el suelo de jardín respondió muy bien en la etapa de germinación. Con estos resultados se puede decir que los tratamientos si contribuyeron tanto en la germinación y supervivencia de plantas en diferentes porcentajes cada uno.

Palabras clave: *especies leguminosa nativas, recuperación ecológica, tratamientos, jales mineros.*

1. INTRODUCCIÓN

Una de las actividades económicas principales del país es la industria minera que es encargada de realizar diferentes procesos, como: la extracción, explotación y el aprovechamiento de los minerales de interés (INEGI, 2019).

La actividad minera es considerada fundamental para muchas regiones del país (Figura 1), debido a que contribuye en gran medida al desarrollo tanto económico como social de las diferentes localidades a las que extiende su impacto y área de influencia. Es de suma importancia poder destacar e identificar a dueños del terreno superficial, los terrenos colindantes con el prospecto, así como, determinar la situación social preexistente e intereses de los involucrados, esto facilitará la comunicación con la población y las autoridades. De manera que, en cada etapa de la actividad minera se fortalezca la comunicación con la comunidad y autoridades locales a fin de obtener la aceptación del proyecto (INEGI, 2019).



Figura 1. Ubicación de principales zonas de extracción de minerales en México.
Fuente: INEGI. Censos Económicos, (2019).

El proceso de cierre de las minas es considerado como un paso fundamental en la Industria minera, además de ser un requisito y estar legislado (NOM 155 SEMARNAT, 2007). Dentro del proceso de cierre de mina es de suma importancia considerar la remediación de los suelos contaminados, principalmente recuperando la vegetación en suelos que han sido abandonados (sin cumplir el proceso de cierre). El sector minero es considerado un factor peligroso por los cuales el suelo es degradado o destruido y con ello conlleva a que la vegetación ha sido afectada con el paso del tiempo (Kupppusamy et al., 2016).

En la tierra la cubierta vegetal es un factor que juega un papel importante por la eficiencia en la disminución de erosión superficial, esto gracias a que las raíces tienen capacidad de retener el sustrato. Por ello, la vegetación en sus procesos biológicos como lo es la transpiración puede regresar una gran porción de agua de percolación a la atmosfera y esto reduce las concentraciones de metales pesados solubles que entran en los cursos de agua (Muñoz et al., 2009). Además, desde los años setenta, antes del surgimiento del concepto de restauración ecológica, Jeffrey *et al.* (1975) ya defendían con vehemencia la importancia que debía tener la diversidad biológica en la recuperación del proceso de cierre de minas, promoviendo enfoques como la fijación biológica de nutrientes, el ciclaje de nutrientes, la descomposición microbiológica, entre otros aspectos. La idea de dicho autor era desarrollar un ecosistema completamente funcional en minas con residuos tóxicos. Por otra parte, también se ha buscado una mayor eficiencia tanto ecológica como económica.

De acuerdo con la gran problemática en la actualidad derivada de las actividades de la industria minera por los daños severos específicamente a la vegetación, suelo y medio ambiente existen en la actualidad diversas estrategias de biorremediación, las cuales están basadas en la incorporación de ciertos organismos para revestir en la medida de lo posible los daños ocasionados. La fitorremediación es una de las biorremediaciones más utilizadas, en este proceso se utilizan plantas de las cuales se tiene conocimiento científico de que pueden absorber, eliminar o contener residuos contaminantes (Maruyama-Nakashita *et al.*, 2007; Chaney *et al.*, 1997). En la actualidad las especies leguminosas se considera que son las más empleadas en estos procesos de biorremediación, porque juegan un papel muy

importante en los procesos de sucesión natural y el incremento de fertilidad en el suelo, dado a estas características se tiene una mejor calidad del suelo (Alderete-Chávez *et al.*, 2008; Prieto *et al.*, 2009).

El uso de componentes químicos en la biorremediación se considera beneficioso en ciertas circunstancias, sin embargo, es importante considerar sus riesgos y beneficios de igual manera. Es conocido que los componentes químicos ayudan a mejorar la degradación de contaminantes, estimular la actividad microbiana o facilitar la movilización de distintos contaminantes, pero también se sabe que existen riesgos como: contaminación adicional a la que ya existe en el sitio y alteración de los ecosistemas. Por ello es importante evaluar aspectos positivos y negativos.

El quitosano es un biopolímero que ha sido utilizado frecuentemente ya que exhibe una variedad de propiedades fisicoquímicas y biológicas que resultan en numerosas aplicaciones en diferentes campos como tratamiento de residuos y agua, agricultura, tejidos, entre otros (Dash. *et al* 2011). Resulta ser muy efectivo contra una amplia gama de patógenos, pues logra la inhibición total o parcial de los patógenos según la especie fúngica (Hernández, 2004).

Dado lo anterior, la buena estrategia y planificación del restablecimiento de vegetación puede disminuir considerablemente los problemas de contaminación del suelo, ayudando también con condiciones favorables para la vida fértil del suelo. Para el éxito de este acontecimiento previamente se necesita llevar a cabo una evaluación completa del sitio y seleccionar la estrategia de remediación que más se adecue a esta, considerando las condiciones locales como la geología, clima, niveles de toxicidad del sitio contaminado, evaluación vegetal, entre otras (Williamson y Johnson, 1981).

En este proyecto de investigación se aborda la problemática que presentan los jales mineros abandonados, específicamente jales abandonados de una minera aledaña al municipio de San Pedro de la Cueva, Sonora. De esta manera se busca tener un tratamiento novedoso y eficiente

para explorar la germinación de diversas especies leguminosas nativas de la región utilizando suelo contaminado proveniente de jales mineros abandonados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Proceso de Extracción Minera.

En el Estado de Sonora la minería es una actividad industrial esencial y bien consolidada, según resultados oficiales destaca que es la principal actividad económica en al menos 22 de 39 municipios del estado de Sonora que cuentan con minas con diferentes minerales de extracción (metálicos, no metálicos, gas, petróleo, carbono), siendo así que el estado representa entre el 10.9 % del PIB estatal, entre otras atribuciones. Para que la industria minera fuera consolidada en lo que hoy en día es, se debió a la estructuración de protocolo con etapas en la minería.

2.1.1 Etapas de la minería.

La primera etapa es la prospección en la cual se identifican características generales (anomalías geológicas, detección de rasgos minerales, entre otros). A partir de la prospección se inicia la exploración que es la segunda etapa, donde consiste en la búsqueda, localización y evaluación de recursos minerales para poder dar seguimiento al desarrollo del yacimiento (tercera etapa) la cual conlleva a realizar actividades que hacen posible la explotación ya sea de manera subterránea o a cielo abierto. Finalmente, en la última etapa en la industria minera tenemos el cierre que, desde el inicio, durante y hacia el final de la vida productiva de la mina, se deben realizar diversas acciones para mitigar el impacto ecológico de las actividades mineras al término de la extracción.

2.1.2 Proceso de Cierre de Mina

Según la Guía Metodológica de Cierre de Minas (Morales & Hantke, 2020) el cierre y postcierre planificado de las minas contribuye a evitar o minimizar los impactos medioambientales, físicos, sociales y económicos negativos a largo plazo, y dejar un terreno lo más estable, seguro y apto para un uso posterior. Adicionalmente el cierre debería incorporar la identificación de oportunidades y de potenciales beneficios para el desarrollo

local y el bienestar de las comunidades aledañas y de los ecosistemas circundantes. Esto puede durar varios años, dependerá del tamaño de la faena y del tipo de mineral procesado. En la etapa de cierre la empresa minera debe realizar las acciones necesarias para que quede un ambiente saludable, seguro y apropiado para la vida de las comunidades del entorno. Este proceso se llama “rehabilitación”.

2.1.3 Estrategias del plan de cierre

La metodología diseñada para la ejecución de un cierre de minas sustentable cuenta con seis etapas principales (Figura 2) (Guerrero *et al.*, 2014):

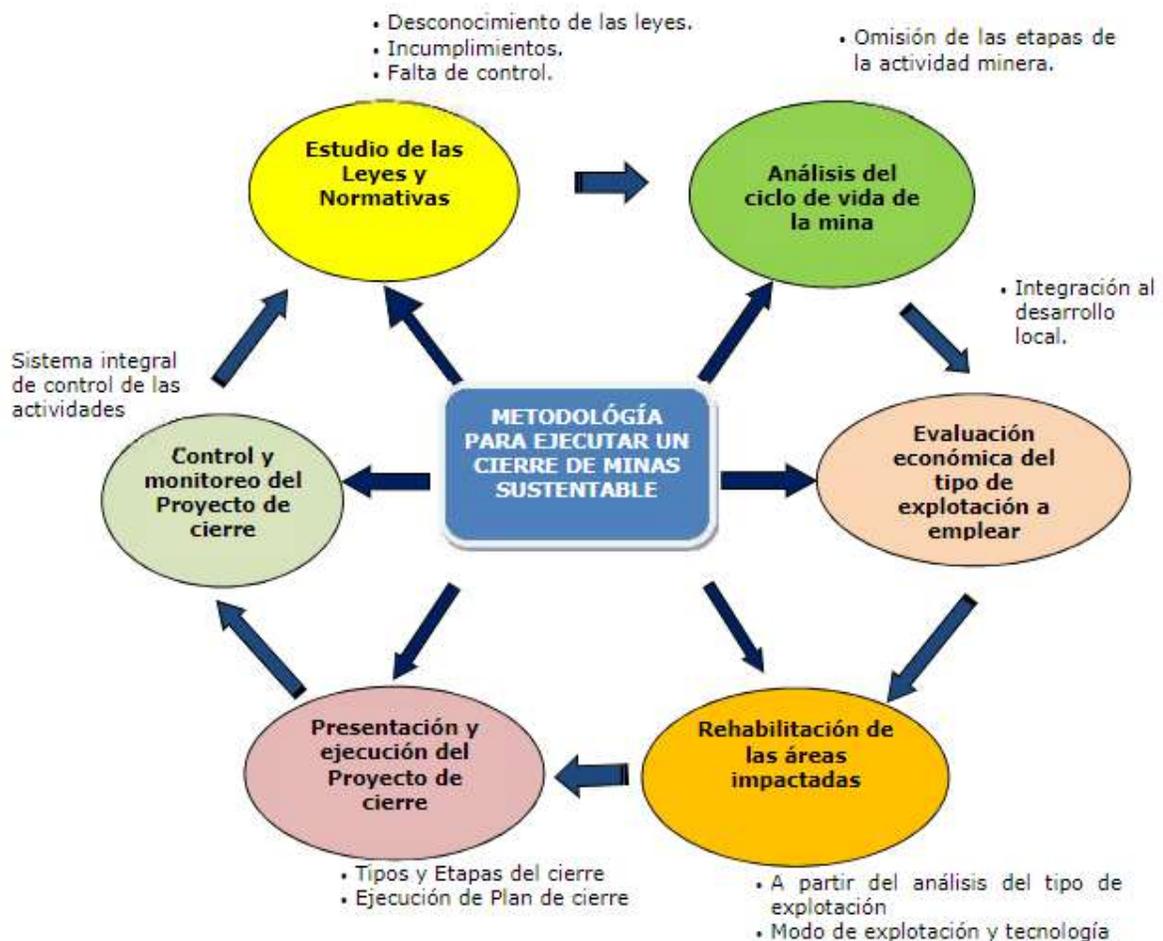


Figura 2. Metodología para la ejecución de un cierre de minas sustentable.

Fuente: Revista ISMM, (2014).

1. El estudio de las diversas leyes y normativas que en la actualidad se encuentran vigentes va a permitir un mejor conocimiento tanto de ellos derechos como de los deberes que se deben aplicar en los proyectos mineros.
2. Los análisis del ciclo de vida de la mina son empleados para poder considerar un diseño y planeación de todos los componentes, involucrando costos de protección ambiental y enfatizar la influencia que estos ejercen sobre todos los procesos asociados a cualquier actividad industrial.
3. La evaluación económica del tipo de explotación a emplear; es una de las etapas que se vuelve más difícil en concretar para el cierre de minas sustentables, en la mayoría de los casos se toma en cuenta primordialmente aspectos relacionados al precio del mineral de extracción, esto termina afectando tanto a la naturaleza como a la sociedad (Martínez 2012).
4. El proceso de la rehabilitación de las áreas impactadas ha demostrado según los diagnósticos de los proyectos de cierre que no existe con exactitud un método aplicable para cada cierre de mina, ya que en cada caso varía según el impacto y el entorno (Milián, 2012).
5. Presentación y ejecución del proyecto de cierre de minas sustentable; es la etapa donde se determinan las condiciones como: ambiente físico, biológico y sociocultural, para posterior a ello realizar procesos de consulta con los organismos competentes para poder ejecutar el cierre.
6. La etapa de control y monitoreo del proyecto de cierre de minas sustentable es donde se identifican factores claves de monitoreo, así como evaluaciones a cargo de las autoridades ambientales para corroborar el cumplimiento de compromisos pactados.

2.2 La Biorremediación o Fitorremediación de Suelos Contaminados

El suelo es un sistema ambiental considerado más estático, esto provoca que los contaminantes que puedan ser vertidos en él permanezcan mucho tiempo, como podría ser el caso de los metales pesados que no pueden ser degradados y su presencia y acumulo en el sistema es una amenaza para los ecosistemas e incluso para la salud de la humanidad (Becerril et al., 2007). El suelo debe tener una calidad para poder sostener el crecimiento de flora y otros organismos, sin embargo, la contaminación es considerada un aspecto importante que contribuye negativamente a la degradación (Maqueda, 2003).

Sin embargo, a principio de los 80 se empezó a originar el término de biorremediación, haciendo alusión también al concepto de remediación que hace referencia a la aplicación de estrategias fisicoquímicas para mitigar el daño y contaminación en suelos, en el caso de la biorremediación busca utilizar uso de microorganismos o plantas que son capaces de degradar o acumular los contaminantes (ArgenBio, 2007). Resultó en los últimos tiempos una estrategia muy interesante debido a la capacidad de algunas especies vegetales y microorganismos que son capaces de tolerar altas concentraciones de metales pesados y compuestos radioactivos principalmente (PQB, 2003). Esta fitotecnología aporta muchas ventajas al suelo y la economía, no se utilizan reactivos químicos que son peligrosos y además costosos para las industrias, ni afectan la estructura del suelo (Cunningham et al., 1995).

2.2.1 La importancia de la recuperación de suelos

Eliminar los contaminantes del suelo tiene gran impacto en los ecosistemas, salud humana, reduciendo riesgos de exposición como enfermedades respiratorias, cutáneas o cáncer. Además de que la remediación de suelos permite cumplir con regulaciones ambientales y normativas que ya están estipuladas, de esa manera la industria minera va a evitar sanciones legales y va a garantizar que las empresas cumplan con las responsabilidades de reparar los daños ambientales ocasionados por sus actividades (Prado, 2011).

México es uno de los países que tiene una tarea importante en remediación de suelos contaminados, con el fin de garantizar un desarrollo sostenible. El trabajo de evaluación y diseño de estrategias adecuadas para reducir o eliminar contaminantes es de suma importancia (Prado, 2011). Así mismo, traería beneficios muy significativos, como: la protección de la biodiversidad y los ecosistemas, también mejoras a la salud humana (reducir riesgos a la exposición de sustancias tóxicas). De esta manera en cada sitio se busca encontrar el método más efectivo y tomando en cuenta minimizar costos económicos (De la Rosa, 2007).

2.3 Importancia de especies leguminosas

Las especies leguminosas es una familia de plantas con flores con más de 19,000 especies distribuidas en 750 géneros (Borges, 2002), son muy importantes porque tienen la capacidad de establecer una asociación simbiótica con bacterias del suelo fijadoras de nitrógeno para los suelos, tienden a adaptarse en diferentes climas y tipos de suelo, por lo tanto, es posible encontrarlas en diversas formaciones ecológicas (Graham y Vance, 2003), en la actualidad son las más utilizadas para la biorremediación, juegan un papel importante en procesos de sucesión natural, incremento de fertilidad, aporte de materia seca de buena calidad, disponibilidad de biomasa en épocas críticas (por la profundidad de sus raíces) calidad de suelo (Alderete-Chávez *et al.*, 2008; Prieto *et al.*, 2009).

Sin embargo, estas plantas, presenta una desventaja en el establecimiento, tiene bajo porcentaje de germinación y por lo tanto en la mayoría de los casos las semillas deben ser escarificadas (Sánchez-Paz y Ramírez-Villalobos, 2006).

2.3.1 Las leguminosas como plantas nodrizas

Las plantas nodrizas se caracterizan por aumentar el establecimiento de semillas y plántulas bajo su sombra. Esto se debe a que mejoran las condiciones microclimáticas, de protección y disponibilidad de recursos (Padilla-Ruiz y Pugnaire, 2006). Las plantas nodrizas cumplen mecanismos de acción (Tabla 1).

Tabla 1. Principales mecanismos de acción de las plantas nodriza.

Efecto de planta nodriza	Ventajas
Sombra de dosel	Reduce la evaporación de agua del suelo. Reduce la temperatura de aire y suelo. Disminuye la incidencia de radiación solar. Evita la salinización en suelos costeros y humedales. Reduce los daños por frío
Ascenso hidráulico	Mejora la disponibilidad de agua
Acumulación de materia orgánica y sedimentos	Provee nutrientes
Interacción positiva entre raíces	Aumenta el intercambio de nutrientes
Barreras físicas o químicas	Protege contra herbívoros
Plantas atractivas	Aumenta las visitas de polinizadores a las plantas de interés

Fuente: (Padilla-Ruiz y Pugnaire, 2006).

El balance que determina el efecto final de plantas nodrizas es la facilitación y la competencia pueden darse simultáneamente (Figura 3). Existen factores fisiológicos y de desarrollo que intervienen en este equilibrio; sin embargo, las condiciones abióticas parecen influir en gran medida (Padilla-Ruiz y Pugnaire, 2006).

Investigaciones previas comprueban la influencia directa en diversas condiciones como suelo y disponibilidad de luz (Blignaut y Milton, 2005; Huber-Sannwald y Pyke, 2005). Se ha encontrado un incremento de supervivencia en plántulas silvestres que están asociadas a un arbusto nodriza, con exposición sur en las laderas, el estudio es de importancia para

determinar la efectividad del nodricismo de una especie vegetal y poderlo aplicar principalmente en ambientes extremos como zonas áridas y semiáridas del territorio sonorense (Padilla-Ruiz et al. 2004).

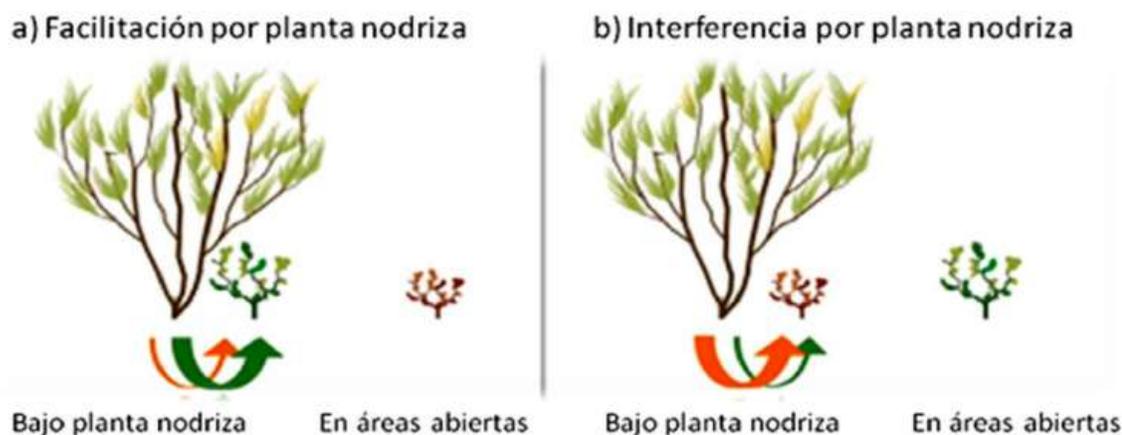


Figura 3. Interacción de plantas nodriza. a) Cuando los efectos positivos son mayores que los negativos, se mejora la supervivencia o crecimiento de las plántulas, en comparación con las de espacios abiertos; b) el resultado contrario se da cuando los efectos negativos superan a los positivos. **Fuente:** (Padilla-Ruiz y Pugnaire, 2006).

2.4 Especies Leguminosas Nativas de Sonora y su Importancia Ecológica

Las plantas nativas crecen de forma natural en zonas o ecosistemas particulares, con el paso del tiempo evolucionan adaptándose a suelos y climas, estas desempeñan un papel particular como: proporcionar alimento o refugio a animales, las hojas eliminan sustancias nocivas del aire, crean ecosistemas mucho más complejos, tienen capacidad de poder controlar su crecimiento con el fin de que no se convierta en maleza, sirven como polinizadoras para su reproducción, entre otras (Cortabarría, 2017). Además, según un estudio de la FAO (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) menciona que las plantas nativas tienen más aminoácidos y vitaminas, estas requieren menos cuidados y gastos (fertilizantes e insecticidas).

Dentro del estado de Sonora algunas de las especies nativas de mayor importancia son (Ortega-Rosas et al., 2022): *Washingtonia robusta*, *Lysiloma sp.*, *Parkinsonia florida*,

Parkinsonia aculeata, *Pithecellobium dulce*, *Acacia spp.*, *Parkinsonia praecox*, *Olneya tesota*, *Caesalpinia sp.*, *Bursera spp.*, *Parkinsonia microphylla*, *Vitex mollis*, *Fouquieria spp.*, *Ipomoea arborescens*, *Tabebuia sp.*, por mencionar algunas.

Se busca la preservación nativa para evitar la extinción, la intervención humana ha alterado el proceso de evolución de algunas especies, afectando el ecosistema. Otra desventaja es que en los últimos años ha sido reemplazada por especies introducidas, haciendo que las desplacen de su lugar de origen, en consecuencia, existe una pérdida de biodiversidad procedente (Cruz y García, 2020).

2.5 Sucesión Ecológica

El principal objetivo de la sucesión ecológica es la dispersión de semillas mediante procesos naturales. Mediante animales dispersores es que puede suceder esta sucesión. La intensidad de dispersión va a depender de la amplitud del área que los animales puedan recorrer (García et al. 2010; García y Martínez 2012; García et al. 2018).

En los principios de restauración se propuso que son los mismos que los de la sucesión ecológica. La restauración ecológica enfatiza en los procesos biológicos a fin de revertir la degradación, al inducir las condiciones requeridas para la sucesión ecológica. (Mac-Mahon 1997).

2.6 Contaminantes que se Encuentran en los Jales Mineros y su Efecto en la Salud Poblacional y Vegetación.

En México la producción y uso de metales base (cobre, plomo, zinc) y preciosos (plata, oro, platino) ha sido clave para la evolución económica del país, pero también se han provocado daños por el manejo inadecuado de residuos mineros (UNEP 2000), los problemas derivados en las industrias mineras es la generación de drenaje ácido de roca (DAR) acompañado de la lixiviación de elementos potencialmente tóxicos (EPT), principalmente en climas húmedos (Freeze y Cherry 1979, Blowes y Ptacek 1994). De acuerdo con los diferentes sitios los jales presentan una mineralogía muy compleja, pero principalmente se encuentran elementos

como: As, Sb, Se, Zn, Cu, Pb, Cd, Bi y Mn que son los que destacan en concentraciones, sin embargo, estos son considerados como EPT visto desde un aspecto ambiental (Moreno et al., 2012).

El crecimiento y desarrollo de la vida en los jales mineros se ve afectada y disminuida en gran medida o en su totalidad derivado de los tóxicos (Puga et. al. 2006), principalmente EPT o presencia de sales de calcio y sodio, además, de la falta de nutrientes, específicamente nitrógeno.

Los tóxicos en jales mineros provocan riesgos en la salud humana ya que estos tóxicos pueden ser dispersos en forma de polvo que queda suspendido en el aire y pueden ser inhaladas y acumularse en el sistema respiratorio (INSHT, 2008). Aún después de que la industria minera haya concluido sus procesos de extracción, si estos sitios son abandonados se sigue corriendo riesgo si no se concluye la etapa de cierre (Puga et al. 2006).

2.7 Antecedentes de Trabajos en Minas

2.7.1 Minera aledaña a San Pedro de la Cueva

Esta mina opera desde 1940 en el municipio de San Pedro de la Cueva, Sonora. Sus actividades consisten en la extracción de mineral por el método de tajo abierto. En la mayoría de los casos la operación minera utiliza agua y otros químicos, como en este caso, que al final van a recaer en las presas de jales donde se lleva a cabo la separación de metales por decantación y ahí quedan todos los residuos, dichos líquidos son los que provocan la liberación de residuos (US EPA, 1994; EPA, 1995). En esta mina como en la mayoría de la industria minera, en la presa de jales existen residuos con un tamaño de partícula variado, la cual se ha ido almacenando con el paso del tiempo, sin responsabilidad del uso de los residuos y tóxicos, sin recuperación de vegetación, con suelos inertes.

2.7.2 Mina Pitalla

En la Mina Pitalla ubicada al sureste del estado de Sonora en el municipio de La Colorada, se llevó a cabo un proceso de fitorremediación específicamente en suelos en la tepetatera

“Primavera”. Se menciona que la actividad minera ocasiona la pérdida vegetal y es posible la restauración de estas áreas con la reintroducción de especies nativas del lugar de estudio. Para ello se utilizaron cuatro especies leguminosas nativas (*P. praecox*, *P. aculeata*, *P. microphyllum* y *P. juliflora*). Posterior a ellos se establecieron cuatro tratamientos distintos, entre ellos están: control (sustrato tepetatera), control-topsoil (sustrato fértil de cubierta superficial del suelo), control-fertilizante comercial y control-topsoil-fertilizante comercial. Los análisis geoquímicos del suelo arrojan una gran diferencia en cuanto a concentraciones entre el sustrato de la tepetatera y el topsoil, los elementos mayores encontrados fueron Fe, Mn, Ti, Ca y K, siendo el Fe más abundante en el sustrato de tepetatera en comparación con el sustrato topsoil.

Como resultado de la germinación de plántulas se observó que la emergencia ocurrió al segundo día en todos los tratamientos para las cuatro especies, obteniendo poco más del 40% de germinación en las cuatro especies, sin embargo, la mayor emergencia se presentó en tratamientos con escarificación, superando el 60% de emergencia.

La especie *Parkinsonia microphyllum* fue la especie que alcanzó mayor porcentaje de emergencia en la mayoría de los tratamientos, tanto en semillas escarificadas como en semillas sin escarificar. Los resultados de supervivencia arrojan que posteriormente a un año de observaciones se tiene un poco más del 10% de supervivencia en las plántulas, sin embargo, las plántulas provenientes del tratamiento con escarificación superaron el 40% de supervivencia y aquellas plántulas provenientes de semillas sin escarificar no superaron el 20%.

2.7.3 Santa Julia, Pachuca, Hidalgo

Algunas ciudades mineras de México han experimentado recientemente una expansión demográfica acelerada, que ha provocado que sus manchas urbanas se expandan a sitios donde existen depósitos de residuos mineros (jales) y que estos lugares se ocupen para asentamientos humanos.

El problema es que en ese tipo de suelo se generan remolinos con partículas de polvo tóxicas para la salud y que no se desarrolla la vegetación debido a que la estructura del suelo no es adecuada por falta de materia orgánica, la compactación del suelo evita que las raíces se

desarrollen y que las características físicas y químicas del suelo presentan metales pesados que afectan el crecimiento de las plantas.

En el estudio de este sitio se hizo la elección de dos especies por sus características físicas y adaptabilidad a condiciones extremas (*Carpobrotus edulis* y *Sedum praealtum*) para la biorremediación de suelo, se diseñó un experimento factorial que permite observar el desarrollo de *Carpobrotusedulis* y *Sedum praealtum* y su relación con cuatro concentraciones de suelo los cuales son: suelo contaminante (jal de mina), sustrato con mejoramiento, 80% de jal con 20% de mejoramiento y 60% de jal con 40% de mejoramiento.

Los resultados obtenidos fueron el crecimiento y supervivencia de ciertas unidades experimentales, la obtención de una paleta vegetal capaz de adaptarse al tipo de suelo de jales mineros y la surgencia de recubrimiento de suelos de jales.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Sonora, la minería es una de las actividades principales del estado, desafortunadamente, la actividad ha llevado a grandes impactos ambientales como es la permanencia de desechos mineros en áreas naturales. El abandono de estos desechos en la mayoría de los casos ha permanecido durante décadas sin tener ninguna atención. Particularmente, en el municipio de San Pedro de la Cueva, se han detectado jales mineros abandonados desde hace décadas sin ser atendidos. El trabajo minero en esta área ha consistido en que la roca sin valor comercial quede sin uso y como material de desecho, lo que ocasiona un problema tanto para el medio ambiente como a la salud de las personas. Actualmente la problemática es el mal manejo de cierre de las minas, esto conlleva a que exista un suelo desertificado, sin vegetación (inerte), por lo tanto, las áreas deben ser ecológicamente recuperadas para dar cumplimiento con las normas vigentes. Con este proyecto de investigación se busca una estrategia para la etapa de recuperación del suelo, incorporando tratamientos novedosos a través de la exploración de las primeras etapas de vida de plantas leguminosas nativas en sustrato proveniente de jales mineros.

4. JUSTIFICACIÓN

Es de gran importancia para la compañía minera desarrollar el trabajo de Cierre de Mina y resolver la problemática de los jales mineros. Lo anterior permitirá minimizar el impacto ambiental y cumplir con la etapa de cierre, por lo que se pretende recuperar el área incorporando en un futuro especies nativas leguminosas. Para lo que primero se requiere de un estudio científico con rigor para validar si las especies de plantas leguminosas propuestas tienen un éxito en la etapa de germinación y supervivencia en diversos tratamientos utilizando jales mineros de dicha mina.

Para llegar a cumplir la normatividad mexicana relacionada al cierre de mina se deben considerar lo siguiente: Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-155-SEMARNAT-2007, que se establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata. Donde menciona que el patio debe ser inhabilitado conforme los siguientes conceptos: establecimiento de vegetación nativa, debe ser cubierta con el suelo recuperado, de ser el caso, con materiales que permitan la fijación de especies vegetales y las especies vegetales que se utilicen para cubrir el depósito deben ser originarias de la región, para garantizar la sucesión y permanencia con un mínimo de conservación.

En este sentido, los resultados de esta investigación podrán generar una propuesta para recuperar los jales mineros y proceder al proceso de establecimiento de especies nativas como lo marca la legislación.

5. HIPÓTESIS

Durante el proceso de término de extracción minera los jales en su mayoría son abandonados sin oportunidades de germinación vegetal de especies leguminosas nativas de región. Es posible que se lleve cabo la recuperación ecológica en estos espacios aplicando tratamientos novedosos como es el suelo de jardín, quitosano, biochar y fertilizante comercial, con el fin de poder asegurar un mayor porcentaje de germinación de dichas especies en suelos altamente contaminados y en su mayoría que fueron abandonados. También dichos tratamientos ayuden a la supervivencia de las plántulas germinadas y de esa manera dar seguimiento en un futuro para poder establecer directamente en el campo.

6. OBJETIVOS

General:

- Evaluar en laboratorio la germinación y supervivencia de especies leguminosas nativas con sustrato de jales mineros de la mina de San Pedro de la Cueva mediante diversos tratamientos.

Específicos:

- Medir la germinación de 4 especies leguminosas utilizando como sustrato jales abandonados de la mina, mediante la técnica de escarificación.
- Medir la tasa de supervivencia de las especies sembradas utilizando sustrato de jales abandonados de la mina, mediante diversos tratamientos durante 4 meses.
- Realizar una caracterización geoquímica del sustrato proveniente del área de jales mineros abandonados.

7. METODOLOGÍA

7.1 Descripción del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en el Municipio de San Pedro de la Cueva, en la porción centro-oriental del Estado de Sonora, a una distancia de 181 km en línea recta al este de la ciudad de Hermosillo, las coordenadas geográficas son: 29° 17' 11'' Lat. Norte 109° 44' 10'' Long. Oeste. El acceso al área de estudio (Figura 4) se realiza a través de la carretera estatal No. 20 saliendo de la ciudad de Hermosillo-Sahuaripa, que conduce al poblado de Mazatán, de aquí, se continúa con dirección al poblado de Villa Pesqueira (Mátape), pasando por el poblado de Nácori Grande, siguiendo ese mismo camino, se llega al poblado de San Pedro de la Cueva.

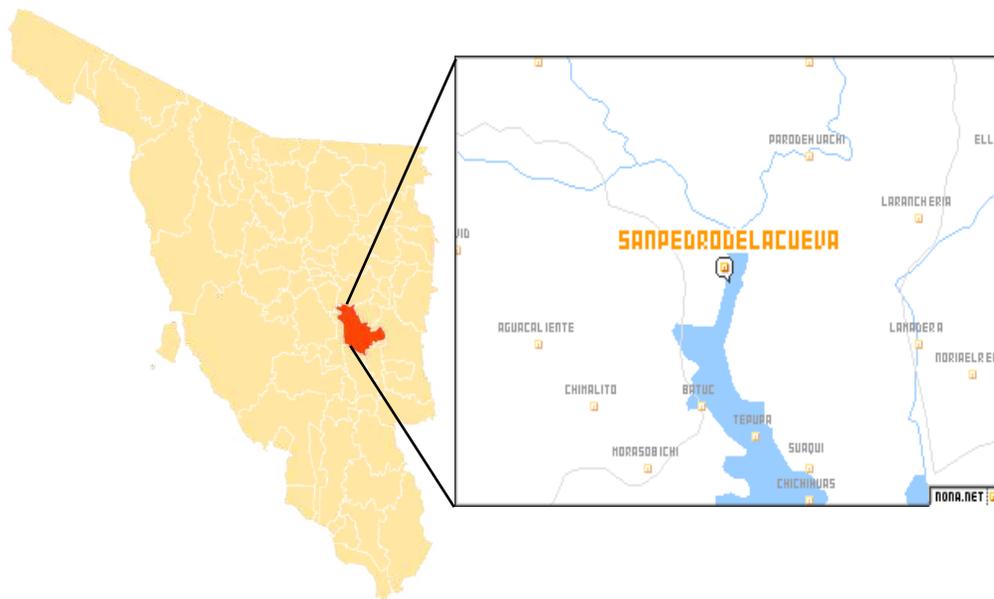


Figura 4. Ubicación municipio de San Pedro de Cueva.
Fuente: Tesis, Universidad de Sonora.

7.1.1 Fisiografía, Clima y Vegetación

La fisiografía del área de estudio corresponde a la Subprovincia Fisiográfica de Sierras y Valles Paralelos. Esta sierra tiene una dirección NW-SE, y está constituida por rocas sedimentarias (calizas y lutitas) del Paleozoico e intrusiones dioríticas y graníticas del Cretácico-Terciario. La topografía es abrupta y el relieve accidentado, con elevaciones que van desde los 400 msnm a un máximo de 2000msnm (Ruiz, 2011). San Pedro de la Cueva cuenta con un clima seco cálido, con una temperatura media máxima mensual de 32.4 °C y una temperatura media mínima mensual de 13.5 °C. La temperatura media anual es de 23.0 °C. La época de lluvias se presenta en verano, en los meses de julio y agosto, con una precipitación media anual de 509.4 milímetros (INEGI, 2019).

La vegetación es selva baja caducifolia conformada por las siguientes especies dominantes: *Cyrtocarpa procera*, *Lysiloma acapulcensis*, *Ipomoea murucoides*, *Ipomoea batatas*, *Erythrina coralloides*, *Bombacopsis quinata* y *Cordia elaeagnoides* y matorral subtropical, formado por *Bursera glabrifolia*, *Eysenhardtia polystachya*, *Acacia pennatula*, *Olea oleaster*, *Uncaria tomentosa*, *Opuntia ficus-indica* y *Myrtillocactus geometrizans*. En menor proporción se encuentran *Cactaceae*, *Prosopis juliflora* y *Parkinsonia* (Ruiz, 2011).

7.2 Pruebas previas de quitosano

El quitosano está compuesto por unidades de poli[β -(1-4)-2-amino-2-desoxi-D-glucopiranosas] (Figura 5). Actualmente el quitosano es considerado un material muy prometedor para varias aplicaciones debido a diversas causas: su ventaja económica al provenir de una fuente natural renovable por ser un subproducto de la industria pesquera no es tóxico, es biocompatible, biodegradable, bioactivo, y además presenta actividad antimicrobiana.

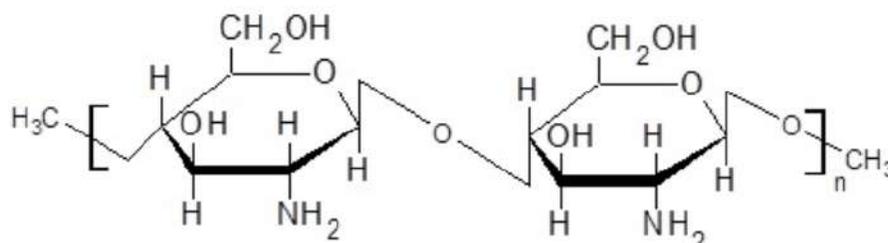


Figura 5. Estructura química del quitosano.

Fuente: (Espinosa *et al*, 2020).

Una desventaja que presenta este material es su incapacidad de disolverse en agua, en soluciones básicas o solventes orgánicos, efecto contrario sucede cuando se adiciona a algunos ácidos como ácido clorhídrico, ácido fórmico, ácido láctico y principalmente en ácido acético.

Por lo anterior se hicieron varias pruebas (Tabla 2) para determinar la concentración de quitosano que se utilizarían para el diseño experimental final.

Tabla 2. Pruebas de concentraciones utilizadas para el quitosano.

Preparación de quitosano				
Quitosano (gramos)	Agua destilada (mililitros)	Ácido acético (μm)	Hidróxido de sodio (μm)	pH
0.5	40	400	200	5-5.10
1.0	40	600	200	5-5.10

Fuente: Elaboración propia.

En la preparación de quitosano se utilizó agua destilada con ácido acético para lograr hacer una mezcla homogénea, posteriormente se usó hidróxido de sodio para lograr un pH de 5 a 5.10 con la finalidad de no dañar o alterar las semillas con las que trabajará. Al tener ambas mezclas observamos que la solución con 1 gramo de quitosano quedaba muy viscosa, lo cual impedía que al mezclar con el sustrato del jale minero estos no se homogenizaban, sin embargo, caso contrario al bajar la dosis a 0.5 gramos, este fue mezclado de manera perfecta, obteniendo de esta manera las concentraciones que se van a emplear (Tabla 2).

7.3 Descripción de Especies (fichas técnicas)

Selección de especies nativas leguminosas:

Las especies leguminosas nativas seleccionadas para este estudio fueron las siguientes:

Palo Verde:

- *Parkinsonia aculeata* (1)
- *Parkinsonia microphyllum* (2)
- *Parkinsonia praecox* (3)

Mezquite:

- *Neltuma juliflora* (4)

7.3.1 *Parkinsonia aculeata*

Tabla 3. Taxonomía desglosada de *Parkinsonia aculeata*.

Taxonomía	
Dominio	Eukaryota
Reino	Plantae
Filo	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida (= Dicotyledoneae)
Orden	Fabales
Familia	Caesalpinaceae
Género	Parkinsonia
Especie	aculeata

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.

Tabla 4. Ficha técnica de *Parkinsonia aculeata*.

Ficha técnica	
Nombre científico/común	<i>Parkinsonia aculeata</i> / Azote de Cristo
Sinónimos	Espinillo, palo verde, espinillo, espina de Jerusalén, bacaporo.
Origen	México hasta Argentina.
Hábitat	Cualquier tipo de suelo sea fértil que se adapte a sus requerimientos.
Descripción botánica	Árbol espinoso, caducifolio o semicaducifolio, dependiendo del clima, de 4-6 (-8) m de altura, con un tronco más bien corto y retorcido y una copa ancha y aparasolada, con ramas extendidas y follaje colgante. Tronco a menudo ramificado desde muy bajo, con la corteza al principio lisa y verdosa, al igual que la de las ramas tornándose con los años oscuros y escamosos.
Hojas	Hojas de 15-35cm, compuestas, raquis linear, planoconvexo, de 1-2,7 mm de ancho, con tres espinas en la base;10 a 40 pares de folíolos de 2 a 8 mm, alternos o algunos opuestos, lineares a obovados, obtusos, caducos.
Fenología	Finales de mayo y principios de junio a julio, fructificando hacia el mes de septiembre.
Flores	Hermafroditas de 2-4 cm color amarillo con manchas rojas pequeñas.
Fruto	Tipo legumbre, glabro, constreñido entre las semillas, de 5-15 cm x 7-8 mm, agudo en ambos extremos, dehiscente; con 3 a 7 semillas; semillas de 8-10 mm.

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.



Figura 6. Flores, hojas, vainas y fruto de *Parkinsonia aculeata*.
Fuente: Imagen propia.

7.3.2 *Parkinsonia microphylla***Tabla 5.** Taxonomía desglosada de *Parkinsonia microphylla*.

Taxonomía	
Dominio	Eukaryota
Reino	Plantae
Filo	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida (= Dicotyledoneae)
Orden	Fabales
Familia	Caesalpinaceae
Género	Parkinsonia
Especie	Microphylla

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.

Tabla 6. Ficha técnica de *Parkinsonia microphylla*.

Ficha técnica	
Nombre científico/común	<i>Parkinsonia microphylla</i> /palo verde
Origen	México, Suroeste de Arizona, y Sureste de California.
Hábitat	Cualquier tipo de suelo sea fértil que se adapte a sus requerimientos.
Descripción botánica	Arbustivo o árbol pequeño hasta de 8 m de altura, el tronco llega a tener hasta 0.3 m de diámetro, la amplitud de la copa es desde los 3.7 hasta 5.5 m. La corteza es delgada.
Hojas	Son pinadas y compuestas de 2.5 cm de largo las cuales en temporada de secas son deciduas.
Fenología	En primavera, de marzo a mayo, se inicia la producción de flores y frutos. Depende de la humedad en el ambiente.
Flores	Son amarillas y numerosas y se encuentran en racimos de 2.5 cm de largo.
Fruto	Fruto de 4-8 cm de largo contienen de 1-5 semillas con presencia de constricciones entre las semillas.

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.



Figura 7. Flores, hojas, vainas y fruto de *Parkinsonia microphylla*.
Fuente: Imagen propia.

7.3.3 *Parkinsonia praecox***Tabla 7.** Taxonomía desglosada de *Parkinsonia praecox*.

Taxonomía	
Dominio	Eukaryota
Reino	Plantae
Filo	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida (= Dicotyledoneae)
Orden	Fabales
Familia	Caesalpinaceae
Género	Parkinsonia
Especie	Praecox

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.

Tabla 8. Ficha técnica de *Parkinsonia praecox*.

Ficha técnica	
Nombre científico/común	<i>Parkinsonia praecox</i> /palo brea
Origen	Nativo de Sonora, México y Baja California
Descripción botánica	Árbol de hasta 7 m de altura; el tallo es fotosintético, retorcido y ramificado muy cerca de la base. Es una especie de crecimiento medio. Es una excelente opción como especie precursora del suelo, ya que se adapta fácilmente a suelos desérticos, degradados, con baja disponibilidad hídrica, y coloniza rápidamente el área.
Hojas	Sus hojas se desprenden en la época de sequía (caducifolio)
Fenología	Florece de septiembre a mayo; en el desierto Sonorense florece de marzo a mayo
Flores	Flores axilares, color amarillo vivo con manchas rojizas en la base de los pétalos, es abundante fuente de néctar y polen.
Fruto	Fruto legumbre de 3-5 cm de longitud, oblongas y comprimidas.

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.



Figura 8. Flores, hojas, vainas y fruto de *Parkinsonia praecox*.

Fuente: Imagen propia.

7.3.4 *Prosopis juliflora***Tabla 9.** Taxonomía desglosada de *Neltuma juliflora*.

Taxonomía	
Dominio	Eukaryota
Reino	Plantae
Filo	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Fabales
Familia	Fabaceae
Género	Prosopis
Especie	Juliflora

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.

Tabla 10. Ficha técnica de *Neltuma juliflora*.

Ficha técnica	
Nombre científico/común	<i>Prosopis juliflora</i> /mezquite
Origen	México y regiones áridas y semiáridas.
Descripción botánica	Árbol o arbusto espinoso, de 2 a 12 m, y hasta 15 m de altura con un diámetro normal de hasta 40 cm. Bajo condiciones favorables de suelo y humedad, tienen hábito arbóreo y en condiciones de aridez extrema arbustivo.
Hojas	Copa amplia y plana, follaje muy ralo y extendido.
Fenología	La floración tiene una duración de seis meses y se presenta en el periodo de noviembre a abril.
Flores	Inflorescencias dispuestas en racimos espigados, cilíndricos, 6 a 8 cm de largo, cáliz pequeño, ancho campanulado, corola amarillenta.
Fruto	Vaina fibrosa e indehiscente, recta, linear, subcilíndrica, amarilla-violácea, con estrías rojas longitudinales, articulaciones subcuadradas.

Fuente: Red de Herbarios Mexicanos.



Figura 9. Flores, hojas, vainas y fruto de *Neltuma juliflora*.
Fuente: Imagen propia.

7.4 Muestreo en Campo

1. Colecta de semillas (antes del periodo de lluvias).

La recolección de semillas frescas se llevó a cabo en la ciudad de Hermosillo y en el trayecto de Hermosillo a San Pedro de la Cueva, previo a la recolección se realizó una práctica de campo para el reconocimiento de las especies a utilizar.



Figura 10. Recolección de vainas en Centro Ecológico. **Fuente:** Imagen propia.

Práctica de campo - jueves 9 de marzo del 2023:

- Rancho San Antonio – carretera Federal 80 (Mina Pilares)
- Cerro Johnson
- Parque Nacameri

Recolección de semillas:

- Centro Ecológico de Sonora
- Universidad del Estado de Sonora
- Trayecto Hermosillo-San Pedro de la Cueva

Se recolectó alrededor de 1 kg de vainas de cada una de las especies (Figura 10) y se depositaron en bolsas de papel con la información correspondiente (fecha, lugar y especie). Las semillas fueron limpiadas y almacenadas en laboratorio a temperatura ambiente hasta su uso posterior (fig. 11).

2. Recolección de sustrato (jale minero):

El sustrato fue recolectado del área de jales de la Mina San Pedro de la Cueva, fue depositado en cubetas plásticas de 20 litros de capacidad y cerradas con tapaderas herméticas para asegurar que no se dispersaran los contaminantes y tampoco interfirieran factores externos al sustrato de interés. El jale fue almacenado en laboratorio a temperatura ambiente hasta su uso posterior.

7.4 Trabajo de Laboratorio

Algunas semillas fueron desechadas debido a la presencia evidente de plagas como insectos (Figura 12). Las semillas óptimas se almacenaron en recipientes de vidrio y se añadió una bolsita de sílica gel para controlar la humedad y conservar la semilla en buenas condiciones hasta su uso (Jara, 1997).



Figura 11. Retiro de vaina para recolectar semillas. **Fuente:** Imagen propia.

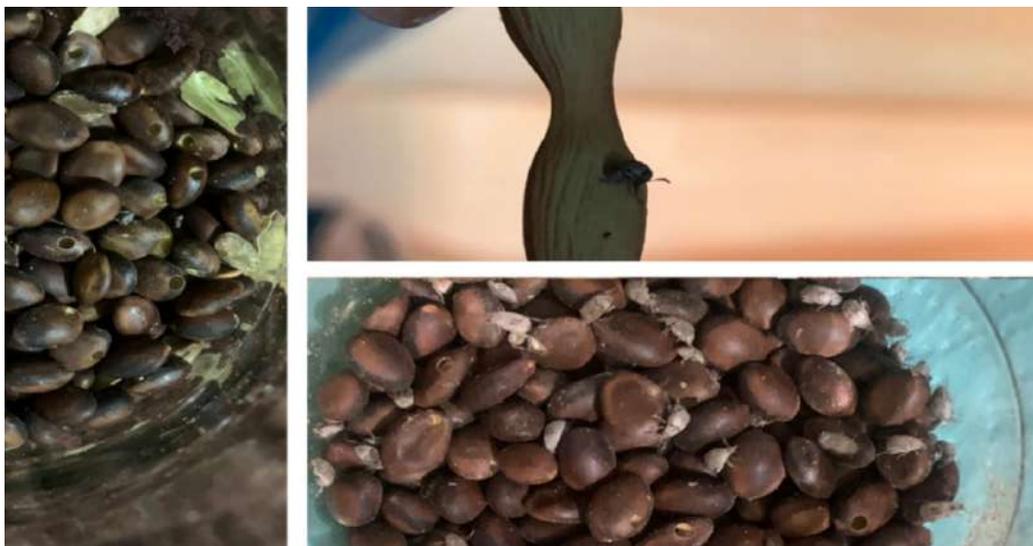


Figura 12. Semillas y vainas invadidas por insectos. **Fuente:** Imagen propia.

Técnicas previas en semillas: Escarificación manual de semillas.

El método de escarificación en semillas (Figura 13) ayuda a reducir los días de germinación en las mismas (Chioc, 2014). La escarificación se realizó de manera manual con lijas (lija de agua grado 320, con medidas de 28 cm por 23 cm), la semilla se lijó hasta llegar al embrión de tal manera que el embrión quedara al descubierto. Dependiendo del tipo de especie la testa difiere en su dureza y grosor, por lo que en algunas semillas se necesitaba lijar más que en otras.

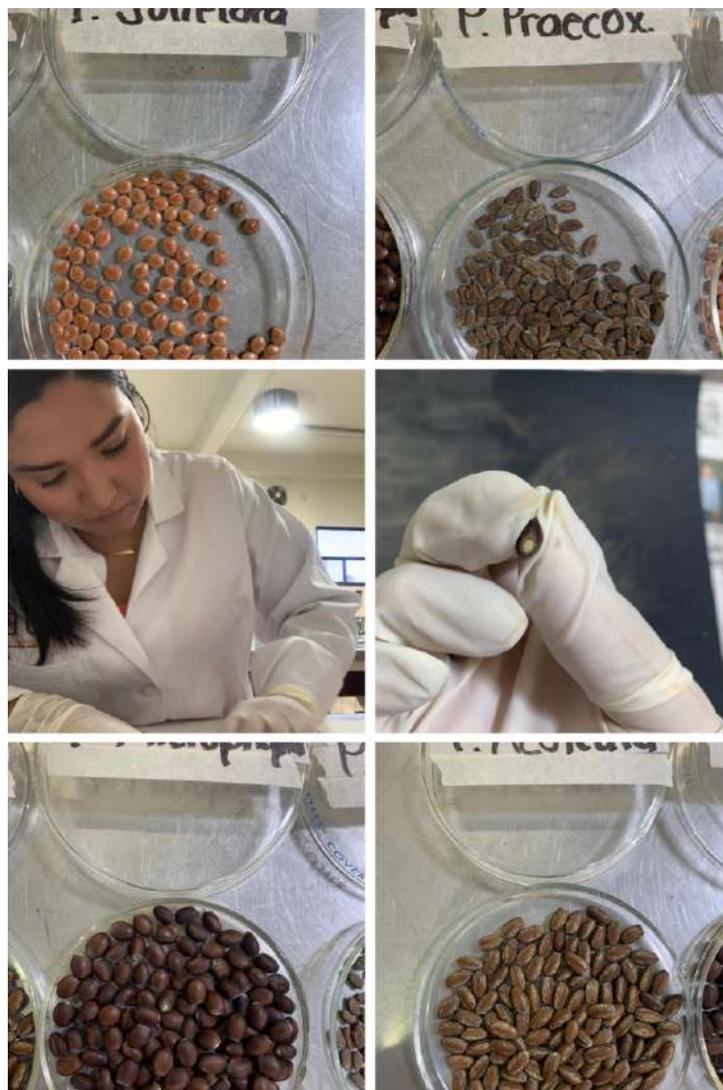


Figura 13. Escarificación de semillas de Palo verde y Mezquite. **Fuente:** Imagen propia.

7.6 Prueba de Viabilidad de Semillas

Para el método de la prueba de viabilidad se hizo en base a la metodología de solución de tetrazolio, para la cual se utilizaron 30 semillas previamente escarificadas, estas fueron depositadas en placas Petri de vidrio. Posteriormente se realizó la solución en un vaso de precipitado, utilizando 1 gramo de tetrazolio disuelto en 10 mililitros de agua destilada, la solución fue vertida en las especies *Parkinsonia praecox* y *Parkinsonia aculeata*. En las especies *Parkinsonia microphyllum* y *Neltuma juliflora* la solución utilizada fue duplicada, ya que el tamaño de la semilla fue más grande y la solución no alcanzaba a tocar la parte donde la testa se encontraba escarificada.

El procedimiento de la prueba de viabilidad se llevó a cabo para asegurar que las semillas que se utilizaron en el diseño experimental fueran viables y que no afectara los resultados del experimento.



Figura 14. Prueba de viabilidad de cada especie. Fuente: Imagen propia.

Tabla 11. Método utilizado para prueba de viabilidad en las distintas especies.

Especie	No. semillas escarificadas	Solución	
		Tetrazolio (gramo)	Agua destilada (mililitro)
<i>Parkinsonia praecox</i>	30	1	10
<i>Parkinsonia aculeata</i>	30	1	10
<i>Parkinsonia microphyllum</i>	30	2	20
<i>Neltuma juliflora</i>	30	2	20

Fuente: Elaboración propia.

7.7 Diseño Experimental de Germinación y Supervivencia (tabla de variables)

Tabla 12. Variables del diseño experimental.

VARIABLES	Definición de la variable	Instrumento para obtención de datos (campo, laboratorio, observación)	¿Qué método vamos a utilizar para recolectar los datos?	Indicadores de los datos a obtener
Dependiente	Germinación (%) Supervivencia (tasa)	Trabajo de laboratorio y observación	Bitácora con observaciones diarias	% de semillas germinadas Días de supervivencia se semillas germinadas
Independiente	Tratamientos germinados Geoquímica	Observación Trabajo de laboratorio	Bitácora con observaciones diarias Laboratorio encargado (UNISON)	Diferencias de germinación entre tratamientos Minerales y contaminantes presentes

Fuente: Elaboración propia.

Diseño de cuatro tratamientos experimentales y el control:

- Control, sustrato del patio de lixiviación (C o T1).
- Control + suelo de jardín (SJ o T2).
- Control + fertilizante comercial (FC o T3).
- Control + quitosano (Q o T4).
- Control + biochar (B o T5).

Tabla 13. Concentraciones utilizadas para el quitosano.

Preparación de quitosano				
Quitosano (gramos)	Agua destilada (mililitros)	Ácido acético (μm)	Hidróxido de sodio (μm)	pH
0.5	40	400	200	5-5.10

Fuente: Elaboración propia.

El quitosano fue preparado en una solución de agua destilada, ácido acético e hidróxido de sodio, esto con la finalidad de regular su pH lo más similar al de las semillas y que de esta manera las semillas no fueran afectadas.

Se realizaron diversas pruebas para llegar a los resultados deseados que es alcanzar el pH entre 5.5 a 5.10, además, se consideró que la mezcla no estuviera viscosa para que al momento de mezclarla con el sustrato del patio de lixiviación fuera homogéneo.

Primeramente, en un vaso de precipitado se vertieron 40 mililitros de agua destilada, al cual se le añadió 0.5 gramos de quitosano, posteriormente los 400 μm de ácido acético, esta solución a su vez iba siendo mezclada, añadiendo poco a poco el hidróxido de sodio (regulador de pH) y midiendo el pH, repitiendo estos tres últimos pasos hasta alcanzar el pH deseado.

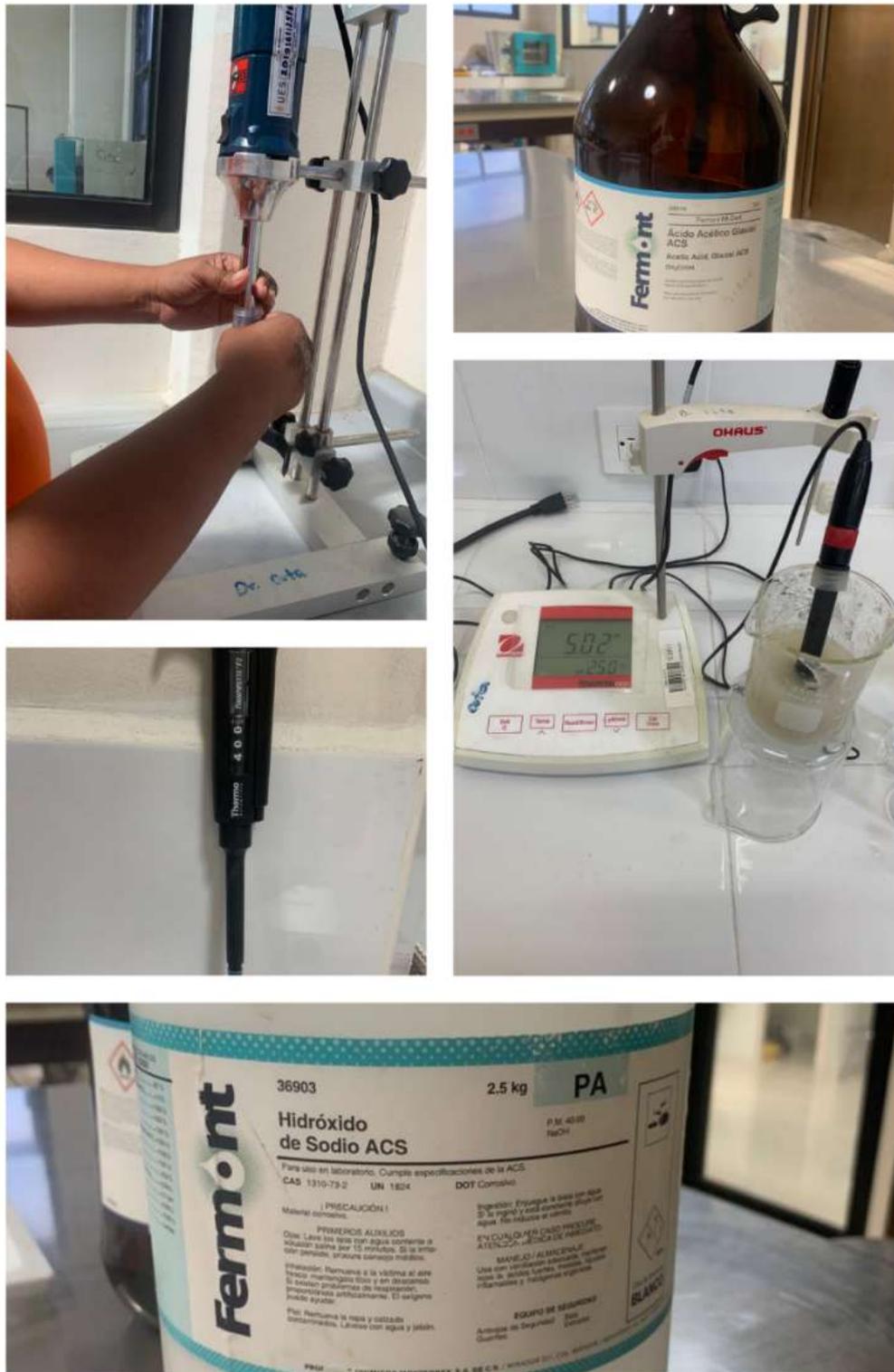


Figura 15. Realización de mezcla de quitosano. **Fuente:** Imagen propia.

Tabla 14. Elaboración de diseños experimentales.

Tratamiento	Especies	Replicas	Testa escarificada	Testa sin escarificar	No. semillas	Concentraciones	
						Sustrato (gramos)	Adición (gramos)
Control (C)	4	6	3	3	10	100	--
Control + suelo de jardín (SJ)	4	6	3	3	10	100	66.66
Control + fertilizante comercial (FC)	4	6	3	3	10	100	3
Control + quitosano (Q)	4	6	3	3	10	100	0.5
Control + biochar (B)	4	6	3	3	10	100	66.66

Fuente: Elaboración propia.

Para la elaboración del diseño experimental primero se pesó 100 gramos del sustrato “C” para cada una de las unidades experimentales, utilizando como recipiente charolas de plástico de ¼ de litro, dando un total de 120 diseños experimentales (5 tratamientos, 4 especies y 6 réplicas).

Para todos los tratamientos se utilizaron 10 semillas y de las 6 réplicas 3 fueron con semillas escarificadas y 3 con semillas sin escarificar.

En el tratamiento C se colocaron las semillas, cada diseño experimental tenía una sola especie.

En el tratamiento SJ además de los 100 gramos de sustrato C se vertieron 66.66 gramos de suelo de jardín y se mezcló hasta homogenizar, posteriormente se colocaron las 10 semillas correspondientes.

En el caso del fertilizante comercial fueron pesados 3 gramos y esparcidos en la parte superior del sustrato C, luego se colocaron las semillas de cada especie en las unidades experimentales.

Para el tratamiento Q se homogenizó la mezcla de sustrato C y la preparación de

quitosano, para después colocar las semillas.

Por último, en el caso del CB se pesó 66.66 gramos de biochar y fue mezclado con el sustrato C y finalmente se colocaron las semillas.

Al montar todos los diseños experimentales se regaron a capacidad de campo.

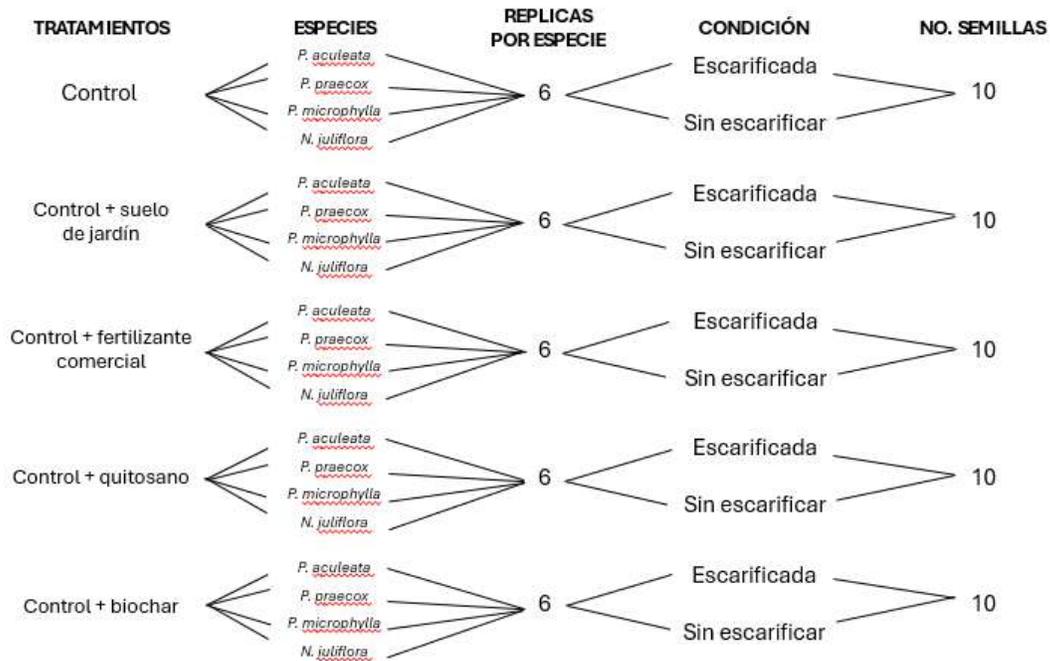


Figura 16. Esquema de diseño experimental. **Fuente:** Imagen propia.



Figura 17. Montaje de tratamientos experimentales. **Fuente:** Imagen propia.



Figura 18. Montaje de tratamientos experimentales. **Fuente:** Imagen propia.

7.8 Análisis Geoquímico de los Suelos Contaminados

Para el análisis geoquímico de suelos contaminados se prepararon muestras que se analizaron en el Laboratorio de rayos X y difracción del departamento de Geología en la Universidad de Sonora.

Para la obtención de muestras se utilizaron 750 gramos de sustrato contaminado (C), se colocó en el equipo Ro-Tap Gilson SS-15, los tamices utilizados fueron; 60, 120, 250 y 325 respectivamente (Figura 15), siendo el no. 60 donde se puso inicialmente el sustrato y siendo el no. 325 el ultimo de donde se recuperó la muestra, obteniendo 20 gramos de sustrato tamizado en un tiempo de 15 minutos.



Figura 19. Proceso de tamizaje con los tamices respectivos. **Fuente:** Imagen propia.

Los 20 gramos de sustrato tamizado fueron separados a la mitad para obtener dos muestras de 10 gramos cada una y así poder tener una réplica de los resultados.

Posteriormente las muestras se almacenaron en bolsas ziploc 2x2 (Figura 16), etiquetando con los datos correspondientes para finalmente ser llevados al laboratorio.



Figura 20. Muestras del sustrato contaminado. **Fuente:** Imagen propia.

8. RESULTADOS

8.1 Viabilidad de las Semillas

Como resultados de la prueba de viabilidad (Tabla 10) se obtuvo una tinción de color rojo (Figura 20) en todas las semillas utilizadas en las 4 especies, dando un 100% de viabilidad.

Tabla 15. Resultados de prueba de viabilidad en semillas.

Especie	Porcentaje de viabilidad
<i>Parkinsonia praecox</i>	100
<i>Parkinsonia aculeata</i>	100
<i>Parkinsonia microphyllum</i>	100
<i>Prosopis juliflora</i>	100

Fuente: Elaboración propia.

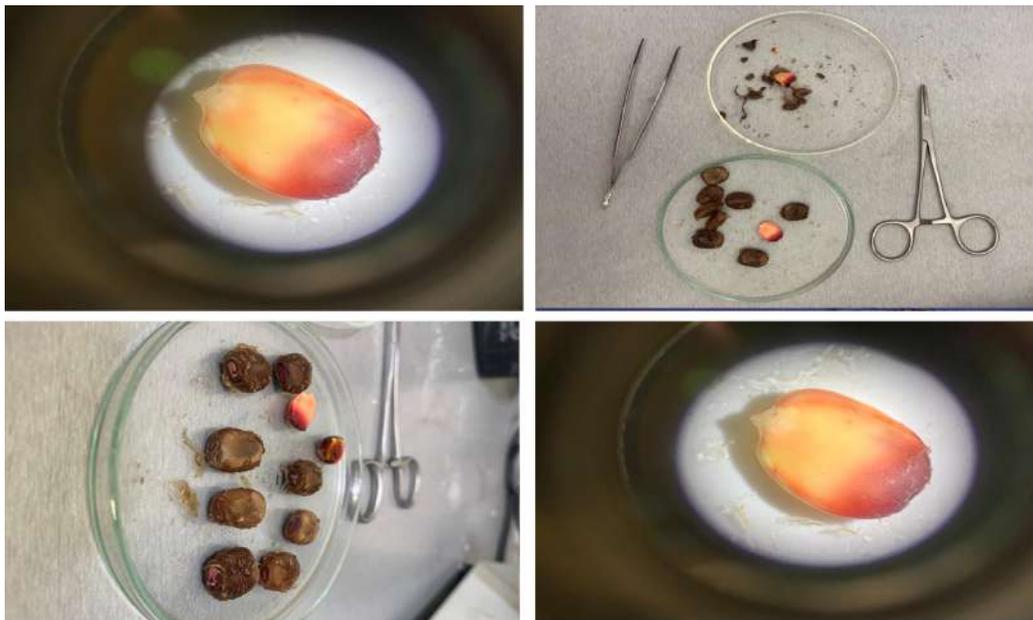


Figura 21. Tinción de las semillas en viabilidad. **Fuente:** Imagen propia.

8.2 Germinación de las Cuatro Especies de Estudio Bajo Diferentes Tratamientos.

La especie que tuvo un mayor porcentaje de germinación fue el caso de la especie *Parkinsonia aculeata* (Figura 21) en el tratamiento SJ con un 76.66% solo bajo condición de testa escarificada, posteriormente en el tratamiento B con 53.33% y en el tratamiento C 23.33 % que al igual que el SJ el porcentaje de crecimiento solo fue en semillas con testa escarificada y por último tenemos la germinación en el tratamiento Q de 13.3% en semillas escarificadas y 3.33% en semillas sin escarificar.

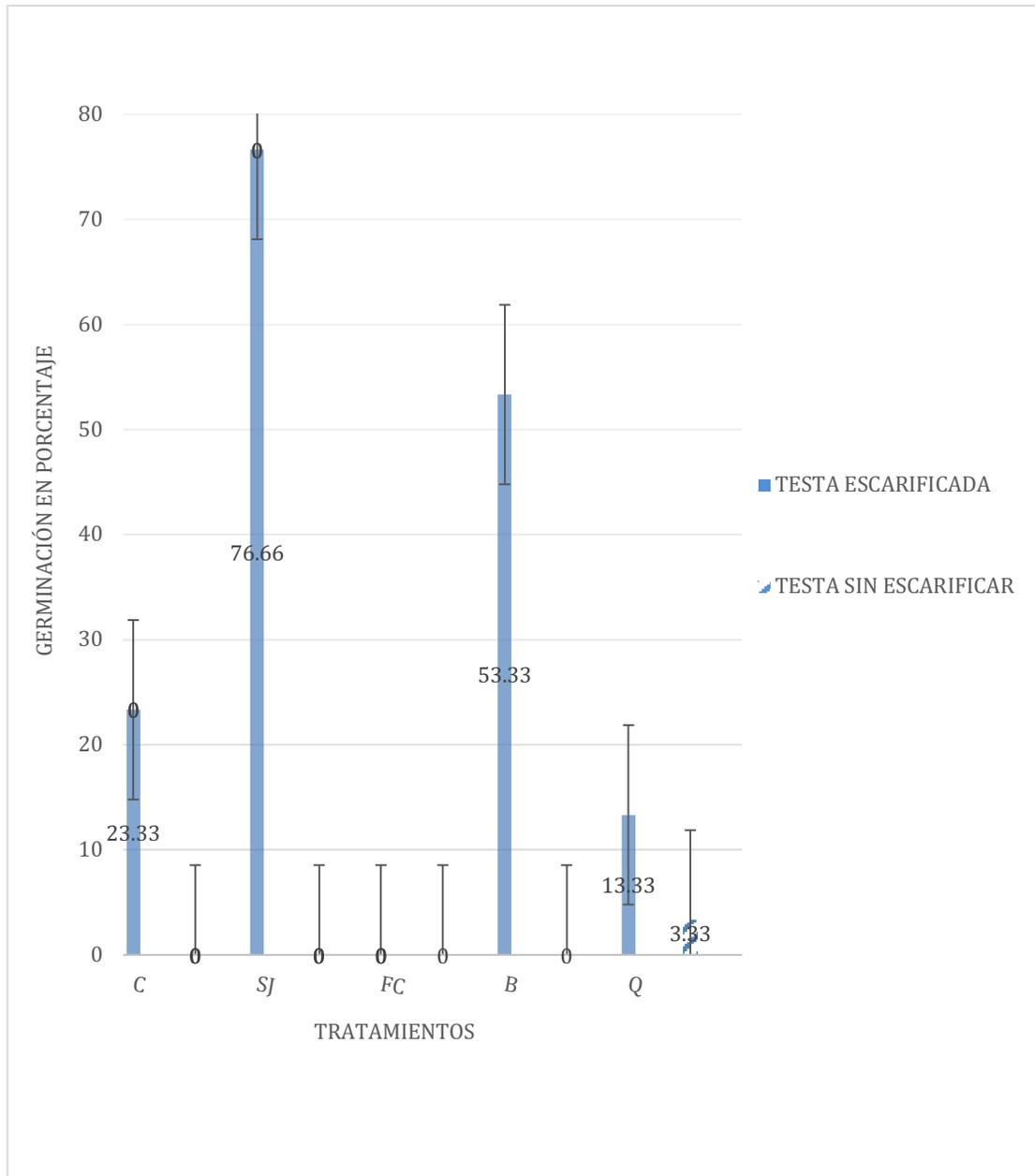


Figura 22. Germinación para *Parkinsonia aculeata*. Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q). **Fuente:** Imagen propia.

La germinación de semillas de *Parkinsonia microphylla* (Figura 22) fue muy homogénea en los tratamientos C, SJ, B y Q. Los promedios de germinación varían entre 23.33% y 43.33% en condiciones tanto de testa escarificada como en testa sin escarificar. En el tratamiento de FC no se tuvo éxito en su germinación en ninguna de las dos condiciones.

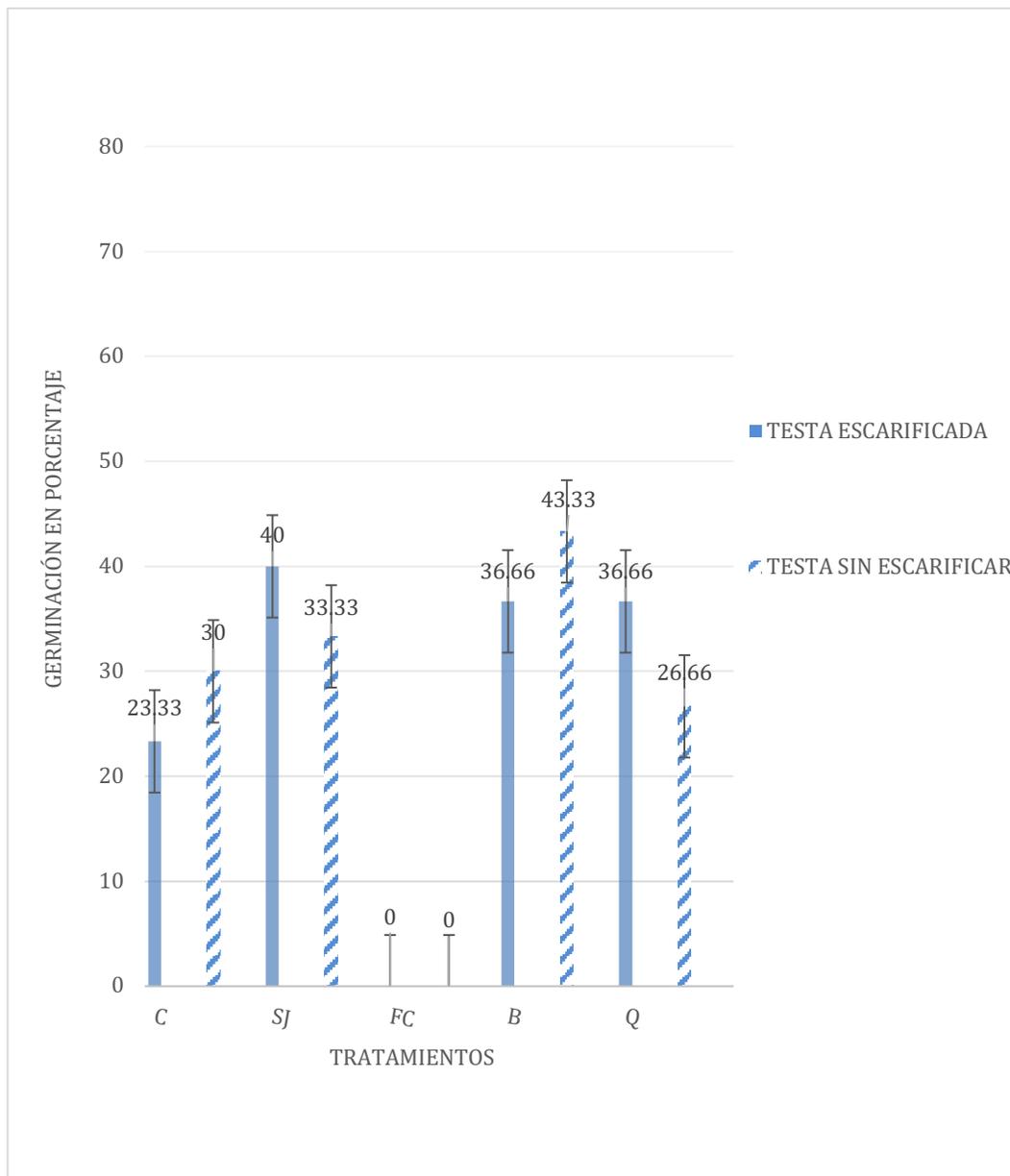


Figura 23. Germinación para *Parkinsonia microphylla*. Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q). **Fuente:** Imagen propia.

La germinación en el caso de la especie *Parkinsonia praeox* (Figura 23) fue mayor en el tratamiento SJ con un 50% en condición de testa escarificada y en testa sin escarificar un 6.66%, posteriormente en el tratamiento Q con un 16.66% y 3.33% en testa escarificada y sin escarificar respectivamente, en el tratamiento C fue de 6.66%

en semillas escarificadas y 16.66% en semillas sin escarificar. En los tratamientos de FC y B no se observó germinación en ninguna condición.

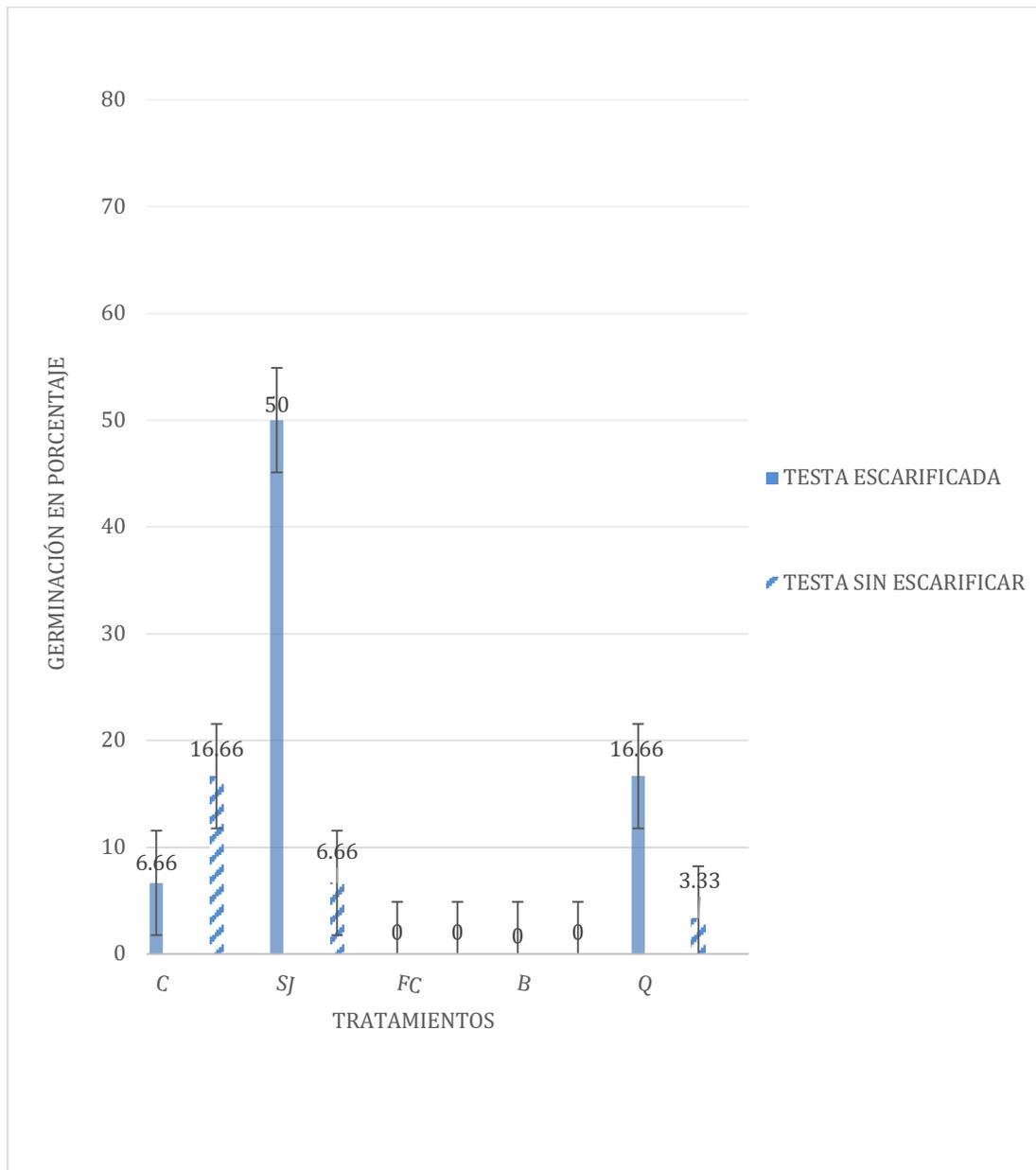


Figura 24. Germinación para *Parkinsonia praecox*. Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q). **Fuente:** Imagen propia.

Por último, la germinación en el caso de la especie *Prosopis juliflora* (Figura 24) fue mayor en el tratamiento SJ con un 33.33% en condición de testa escarificada y solo un 6.66% en testa sin escarificar, posteriormente en el tratamiento C con 9.99% en

semillas sin testa escarificada y 3.33% en semillas con esta escarificada, en el caso del tratamiento B solo germinó un 9.99% en semillas con testa sin escarificar y al contrario en el tratamiento Q solo germinó un 6.66% en semillas con testa escarificada.

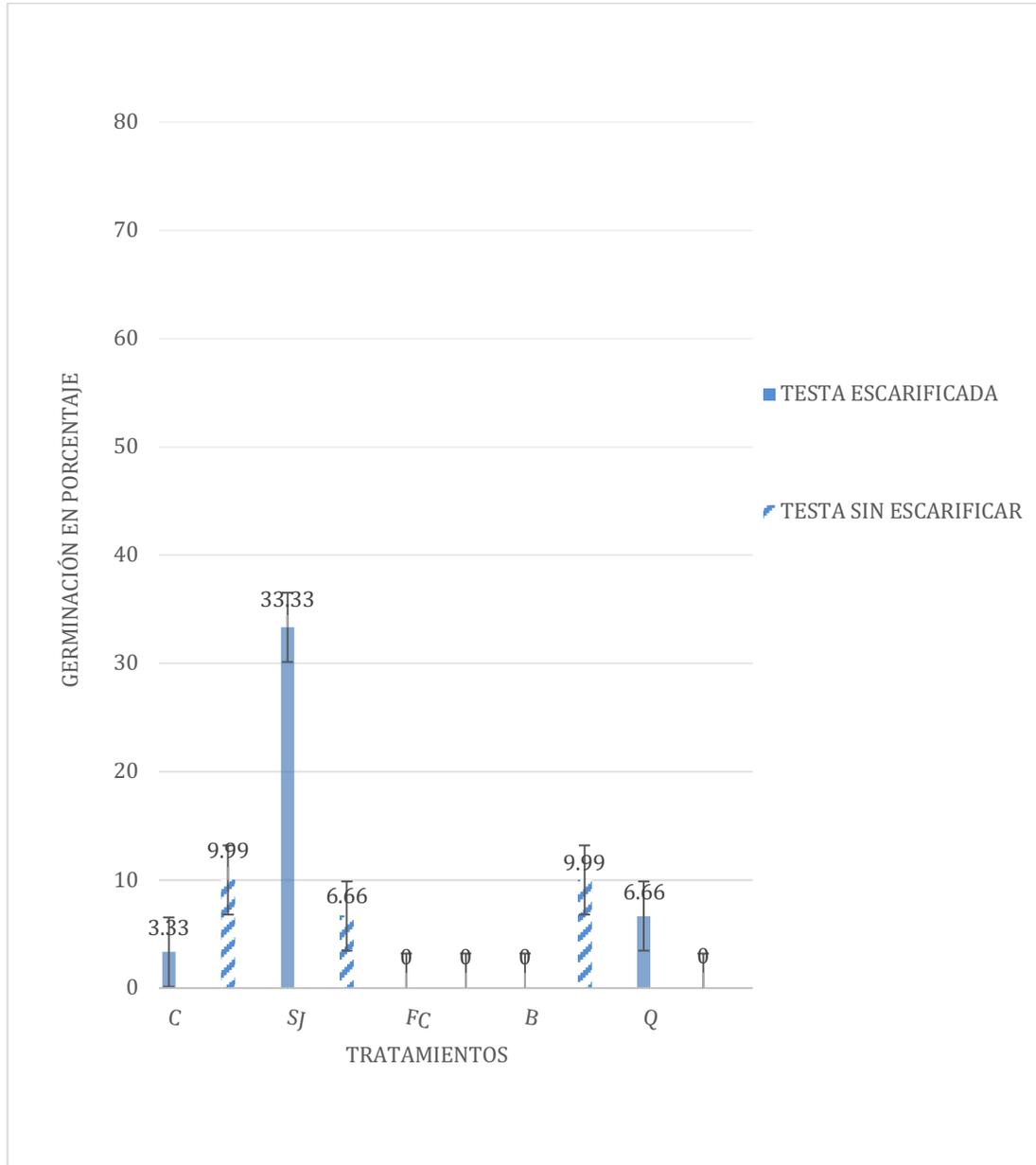


Figura 25. Germinación para *Neltuma juliflora*. Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q). **Fuente:** Imagen propia.

Tenemos como resultado una tabla sintética de los porcentajes de germinación de cada una de las especies en todos los tratamientos y en ambas condiciones empleadas (testa escarificada y sin escarificar). El número de las especies están enumeradas de la siguiente manera: especie 1 (*Parkinsonia aculeata*), especie 2 (*Parkinsonia microphylla*), especie 3 (*Parkinsonia praecox*) y especie 4 (*Neltuma juliflora*).

Tabla 16. Sintética de germinación en porcentajes.

Especie	T1 (C) %	T2 (SJ) %	T3 (FC) %	T4 (B) %	T5 (Q) %
escarificada					
1	23.33	76.66	0	53.33	13.33
2	23.33	40	0	36.66	36.66
3	6.66	50	0	0	16.66
4	3.33	33.33	0	0	6.66
Especie sin escarificar					
1	0	0	0	0	3.33
2	30	33.33	0	43.33	26.66
3	3.33	6.66	0	0	3.33
4	9.99	6.66	0	9.99	0

Fuente: Elaboración propia.

8.3 Supervivencia de las Cuatro Especies Durante 4 Meses

En el primer mes de supervivencia (Tabla 12) claramente se observa que en el T1 (C) solamente sobrevivió un 50% de individuos en la especie 3 (*Parkinsonia praecox*) en la condición de testa escarificada, en el T2 (SJ) si se tuvo una mayor supervivencia al igual que T4 (B) y T5 (Q), siendo este último el que más éxito tuvo y en el caso T3 se tiene que no existe supervivencia alguna en ningún tratamiento en ambas condiciones.

Tabla 17. Porcentaje de supervivencia durante el primer mes.

Especie	T1 (C) %	T2 (SJ) %	T3 (FC) %	T4 (B) %	T5 (Q) %
escarificada					
1	0	73.91	0	87.5	100
2	0	91.66	0	100	100
3	50	100	0	0	100
4	0	100	0	0	100
Especie sin					
escarificar					
1	0	0	0	0	100
2	0	100	0	100	100
3	0	100	0	0	100
4	0	100	0	100	0

Fuente: Elaboración propia.

El segundo mes (Tabla 13) podemos visualizar que las plántulas en T1 (C) no sobrevivieron y en T2 (SJ) y T3 (FC) se ve una notoria disminución de la supervivencia de las plántulas, en T5 (Q) también existe una disminución, pero en un porcentaje menor a los tratamientos anteriormente mencionados.

Tabla 18. Porcentaje de supervivencia durante el segundo mes.

Especie	T1 (C) %	T2 (SJ) %	T3 (FC) %	T4 (B) %	T5 (Q) %
escarificada					
1	0	30.43	0	43.75	100
2	0	75	0	90.9	90.9
3	0	80	0	0	100
4	0	90	0	0	100
Especie sin					
escarificar					
1	0	0	0	0	100
2	0	80	0	84.62	87.5
3	0	80	0	0	100
4	0	100	0	33.33	0

Fuente: Elaboración propia.

En el tercer mes (Tabla 14) fue más notable la supervivencia en T2 (SJ) y T4 (B), que en su mayoría tuvo un porcentaje menor al 50% en plántulas vivas en ambas condiciones manejadas, en T5 (Q) tenemos porcentajes de supervivencia no tan bajos como en los demás tratamientos.

Tabla 19. Porcentaje de supervivencia durante el tercer mes.

Especie	T1 (C) %	T2 (SJ) %	T3 (FC) %	T4 (B) %	T5 (Q) %
escarificada					
1	0	14.29	0	12.5	80
2	0	50	0	63.64	90.9
3	0	33.33	0	0	100
4	0	30	0	0	100
Especie sin					
escarificar					
1	0	0	0	0	0
2	0	40	0	30.8	75
3	0	0	0	0	100
4	0	50	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

En el cuarto mes solo sobrevivieron plántulas del tratamiento T5 (Q) en la especie *Parkinsonia microphylla*, un 45.45% en condición de testa escarificada y un 12.5% en semillas con testa sin escarificar.

Tabla 20. Porcentaje de supervivencia durante el cuarto mes.

Especie	T1 (C) %	T2 (SJ) %	T3 (FC) %	T4 (B) %	T5 (Q) %
escarificada					
1	0	0	0	0	25
2	0	0	0	0	45.45
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
Especie sin					
escarificar					
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	12.5
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

8.4 Caracterización Geoquímica del Jal Minero

En el análisis geoquímico del jale minero (Tabla 21) obtuvimos los valores de los elementos mayores como lo son el Si, Fe, Ca y K, predominando el Fe con 55,152.98 mg/g y en menor cantidad encontramos el K con 8,003.01 mg/g.

Tabla 21. Elementos mayores presentes en jal minero.

Elemento	Concentración mg/g
Silicio (Si)	22,968.17
Hierro (Fe)	55,152.98
Calcio (Ca)	9,385.94
Potasio (K)	8,003.01

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de elementos menores y trazas se encontraron 27, todos en diferentes concentraciones (Tabla 22), en ellos se encuentran elementos que son considerados tóxicos, como lo son el S, Zn, Cu, Ni, Co, Sb, Sn, Cd y Pb. Siendo Pb encontrado con 4,664.95 mg/g, Zn con 2,429.96 mg/g, Cu con 274.89 mg/g, Cu con 237.49 mg/g y Sb con 333.29 mg/g los cuales son los más elevados en concentración según el análisis geoquímico realizado. Los elementos y concentraciones nos indican claramente la problemática que se tiene en el sitio en relación suelo-vegetación, que con el paso del tiempo la vegetación no se ha podido establecer y se volvió un suelo inerte.

Tabla 22. Elementos menores y trazas presentes en jal minero.

Elemento	Concentración mg/g
Molibdeno (Mo)	10.49
Circonio (Zr)	84.38
Estroncio (Sr)	229.48
Rubidio (Rb)	65.17
Torio (Th)	17.99
Plomo (Pb)	4,664.95

Selenio (Se)	6.48
Arsénico (As)	1,022.20
Cinc (Zn)	2,429.96
Wolframio (W)	99.76
Cobre (Cu)	274.89
Níquel (Ni)	22.83
Cobalto (Co)	237.49
Manganeso (Mn)	1,248.07
Antimonio (Sb)	333.29
Estaño (Sn)	15.12
Cadmio (Cd)	13.98
Niobio (Nb)	5.36
Itrio (Y)	13.80
Cromo (Cr)	68.44
Vanadio (V)	94.55
Titanio (Ti)	1,698.20
Escandio (Sc)	32.06
Azufre (S)	3,510.08
Bario (Ba)	3,618.99
Paladio (Pd)	7.48
Cloro (Cl)	249.11

Fuente: Elaboración propia.

8.5 Análisis Estadístico de los Resultados

8.5.1 Germinación

La germinación de semillas se avaluó a los 15 días después de que fueron sembradas en sus respectivos tratamientos. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con ayuda del programa JMP (SAS Institute, 1999), al mismo tiempo con el programa se realizó previamente una transformación arcoseno de todos los datos obtenidos para cumplir con los supuestos del modelo (Zar, 1999).

El análisis estadístico mostró diferencias significativas en la germinación entre tratamientos y especies ($F= 56.7725$, g. l.= 1, $P= < .0001$ y $F= 101.2002$, g. l.= 1, $P= < .0001$), germinación en el tiempo ($F= 9.1924$, g. l.= 1, $P= < .0001$) y germinación entre ambas condiciones ($F= 198.3400$, g. l.= 1, $P= < .0001$).

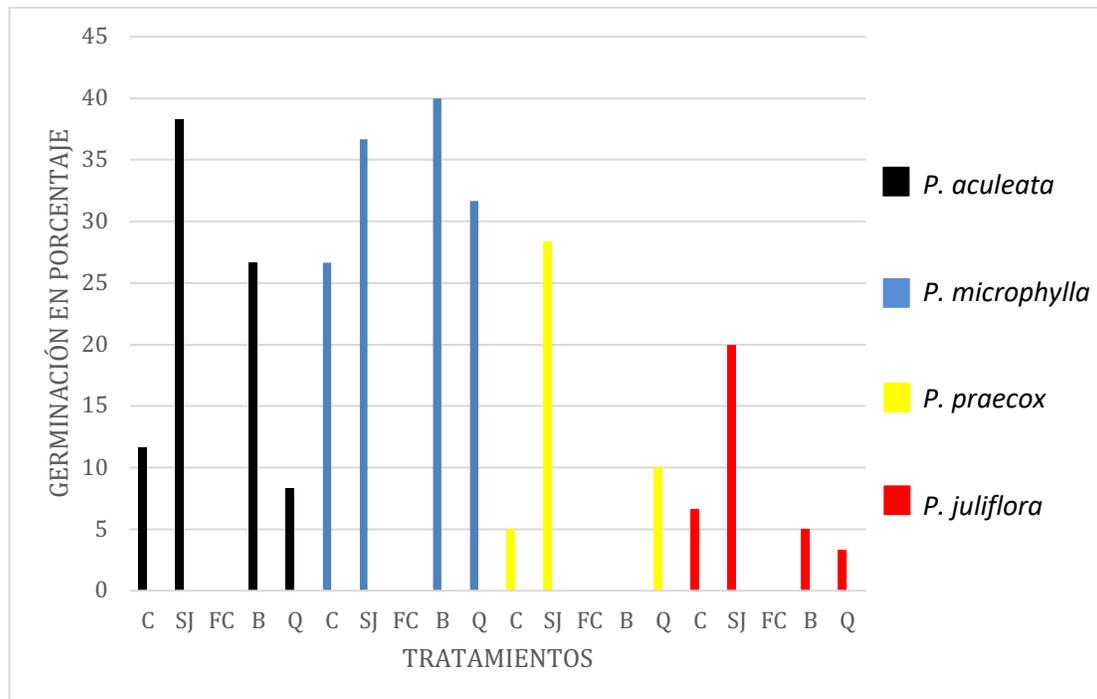


Figura 26. Germinación en porcentaje para las especies *Parkinsonia aculeata*, *Parkinsonia microphylla*, *Parkinsonia praecox* y *Neltuma juliflora* en cada uno de los tratamientos. Control (C), suelo de jardín (SJ), fertilizante comercial (FC), biochar (B) y quitosano (Q). **Fuente:** Imagen propia.

8.5.2 Supervivencia

La supervivencia de las plántulas fue analizada con la prueba de Log-Rank Test de Peto & Peto (Pyke & Thompson, 1986). Con la prueba se compararon los diferentes tratamientos empleados, especialmente el tratamiento de quitosano contra los demás tratamientos (control, suelo de jardín, fertilizante comercial y biochar), esto debido a que las plántulas en el tratamiento de quitosano fueron las que sobrevivieron más tiempo y evidentemente va a existir una diferencia significativa entre aquellos que sobrevivieron menos y el quitosano que sobrevivió más tiempo. Adicional a las comparaciones entre tratamientos también se realizó la comparación entre las dos condiciones de las semillas (testa escarificada y testa sin escarificar), para poder saber si escarificar contribuye o no a una mayor supervivencia de las plántulas.

En cuanto a la supervivencia de plántulas en los diferentes tratamientos, inicialmente el número de plántulas prevalecía en las primeras semanas, sin embargo, después decayendo el porcentaje de supervivencia, variando el tratamiento. Notoriamente en el tratamiento control fue en donde las plántulas fueron muriendo muy rápidamente, empezando principalmente a secarse y marchitarse, sin tener oportunidad de crecimiento.

Al comparar la supervivencia de plántulas encontramos diferencias significativas entre las semillas escarificadas y semillas sin escarificar (LR= 273.91, g. l.= 1, P= < 0.0001), el tratamiento de quitosano y el control (LR= 84.77, g. l.= 1, P= < 0.0001), el tratamiento de quitosano y fertilizante comercial (LR= 116.75, g. l.= 1, P= < 0.0001). Caso contrario ocurrió al comparar la supervivencia de plántulas entre el tratamiento de quitosano y suelo de jardín (LR= 30.47, g. l.= 1, P= > 0.05) y el tratamiento de biochar y quitosano (LR= 2.45, g. l.= 1, P= > 0.05).

9. DISCUSIÓN

Actualmente, en el mundo son abundantes los suelos degradados sin oportunidad de aprovechamiento por la falta de recuperación de estos. El establecimiento de plantas constituye una de las posibilidades de utilización de suelos degradados, las leguminosas cumplen una función importante porque sus raíces son capaces de fijar nitrógeno del aire, que la misma planta utilizará como fertilizante, pero además parte de ese nitrógeno regresa al suelo, lo cual mejorará la fertilidad (Ferrari y Wall, 2004). En este trabajo se exploró la posibilidad de utilizar plantas que son nativas de la región y que son leguminosas (*Parkinsonia aculeata*, *Parkinsonia microphylla*, *Parkinsonia praecox* y *Neltuma juliflora*), para que ayudarán al suelo en su recuperación vegetal, como es el beneficio de la fijación de nitrógeno, sucesión ecológica, retención de agua, reservas de materia orgánica, además, tienen mejor respuesta ante el estrés hídrico que puedan sufrir por las sequías de la región, características de estas especies que son de ayuda para el tipo de suelo en el que se va a trabajar y que a futuro se tengan ventajas para poder establecer en el campo, de acuerdo con las características ambientales que ya se conocen. Además, de incorporar las especies adecuadas para el sitio que se desea recuperar, también se tomó en cuenta las características de las semillas.

Se conoce que la latencia física en semillas, principalmente en especies de mezquite (*Neltuma*) disminuye una rápida germinación de estas. También pudiera retrasar el tiempo de germinación el estadio normal de las semillas conocido como la dormancia, que es el estado en el que se encuentra una semilla que es totalmente viable pero que no germina, aunque tenga las condiciones adecuadas para hacerlo (humedad, aireación y temperatura), esto se debe a que presenta una cubierta impermeable al agua (Rolston, 1998). Por ello en el diseño experimental empleado en este trabajo, se consideraron dos condiciones: testa escarificada y testa sin escarificar, de esta manera poder comprobar si existe alguna diferencia entre las condiciones.

Con esto comprobamos que si existió un mejor resultado de germinación en los tratamientos con semillas escarificadas a comparación de las que no se escarificaron en diseño experimental empleado, sin embargo, se conoce que la germinación de palo

verde y mezquite es superior al 95% (Caughey et al., 2018) en condiciones de reforestación de suelos sin contaminación, por lo que podemos afirmar que la contaminación del jale minero impide que logre tener la mayor germinación natural de las semillas. Posteriormente a ello incorporamos diversos tratamientos, los cuales en algunos obtuvimos resultados positivos y en otros negativos, como fue el caso del tratamiento con fertilizante comercial.

Los fertilizantes químicos han contribuido al rendimiento de los cultivos, produciendo un aumento en la producción de alimentos en el mundo, sin embargo, también existen casos en donde los fertilizantes tienen impactos negativos tanto en el agua (lixiviación, aguas subterráneas y superficiales), suelo (variación del pH, deterioro de la estructura del suelo y deterioro microfauna) y el aire (Ulibarry, 2019). En el caso de nuestra investigación se tuvo un resultado negativo, ya que fue nula la germinación para todas las especies sin excepción alguna en el tratamiento de fertilizante comercial, esto pudo deberse principalmente a que el fertilizante que se empleó cambió los niveles de acidez del suelo afectando directamente a las semillas, afectando las condiciones naturales que necesita para poder iniciar su proceso de germinación.

El tratamiento de suelo de jardín fue un caso exitoso en la germinación, ya que con la implementación de este en el sustrato contaminado obtuvimos un suelo con una mejor textura y contenido de materia orgánica, la cual influye en la capacidad de retención de agua de los suelos, por lo tanto, ayuda a la germinación. En términos ideales, la textura y la humedad del suelo deben ser tales que el suelo húmedo esté firmemente en contacto con la semilla (da Silva *et al.*, 2007; Ferreira *et al.*, 2016). Sin embargo, a pesar de que fue el tratamiento con mayor porcentaje de germinación y los resultados fueron muy favorables en dicha etapa, por el lado contrario la supervivencia no fue la mejor, debido a que los beneficios que aportó el suelo de jardín fue mayormente en poder ayudar a la semilla a iniciar su proceso de germinación, pero, el suelo de jardín no contó con propiedades necesarias para poder contener contaminantes presentes en el suelo, que es de lo que las plántulas se estaban alimentando principalmente y debido

a las concentraciones de metales pesados que se encontraban en el jale minero, la supervivencia de las plántulas alcanzó solamente tres meses.

Por otro lado, de acuerdo con (Parra, 2016) el biochar visto desde el ámbito ambiental tiene muy buena capacidad de poder retener contaminantes disminuyendo su movilidad y disponibilidad, esto beneficiando a generar un acondicionamiento óptimo en el entorno de los microorganismos benéficos al limitar el potencial de dichas sustancias contaminantes sobre algunos grupos de organismos, por otro lado hablando de la estructura física del biochar, también trae consigo ventajas ya que su estructura es porosa y proporciona un hábitat adecuado para diversos microorganismos, además (químicamente) el alto contenido de carbonos aromáticos, ya que los microorganismos utilizan dichos carbonos como aceptores y receptores de electrones durante su metabolismo, el biochar, confiere propiedades eléctricas que dan lugar a reacciones de oxidación y reducción (Villacís et al., 2016). También (Preston, 2013) menciona que ayuda en el mejoramiento de la fertilidad del suelo, incrementa la retención de agua, nutrientes y microorganismos. Se considera que ayuda a mitigar el cambio climático a través de la captura de carbono.

Hace pocos años a la fecha se ha intensificado el uso de biochar, se ha empleado como una estrategia viable de tratamiento en sistemas agroforestales, por sus ventajas de mejoramiento de las condiciones tanto físicas como químicas del suelo (Iglesias, 2018), cabe mencionar que el biochar tiene una buena composición química que ayuda al crecimiento de las plantas, tiene altas concentraciones de oxígeno y carbón, la presencia de nutrientes como potasio, calcio, magnesio, fósforo, azufre (Escalante et al., 2016). La estructura física microscópica del biochar es la clave de su éxito en la reducción de la contaminación por metales pesados (Suppadit, Kitikoon, Phubphol, & Neumnoi, 2012), ya que puede mejorar la estructura del suelo y la retención de agua, mejorar la disponibilidad y retención de nutrientes, mejorar la acidez y reducir la toxicidad de metales pesados en las raíces de las plantas (Kugler et al., 2010). El pH es una para parte a considerar ya que el biochar es alcalino, es decir un $\text{pH} > 7$, por lo

que su aplicación en el suelo dependerá el efecto sobre el mismo (Velázquez-Machuca et al., 2019). El biochar son materiales porosos los mismo que serán encargados de la retención de agua, también son poco densos y tiene una elevada área superficial por lo que determina su reactividad para retener iones en su superficie (Aker, 2014). Debido a los beneficios y ventajas que el biochar tienen en las plantas, en este tratamiento aplicado fue uno con los mejores rendimientos en la supervivencia de las plántulas, alcanzando así en algunos casos casi los cuatro meses de vida en una de las especies de palo verde (*Parkinsonia microphylla*), en el caso de la germinación, este tratamiento de biochar al igual que el tratamiento de suelo de jardín fueron los que mejor tuvieron resultados, pero a comparación del suelo de jardín el biochar tiene un mejor resultado en cuestión de sobrevivencia de la plántula.

El último tratamiento empleado fue con quitosano, el cual es utilizado aproximadamente desde 1990 en cultivos agrícolas porque ayuda a combatir bacterias patógenas ya sea matándolas u obstaculizando su crecimiento (Yin y Du 2011). En la actualidad algunos autores (Rabea et al. 2003; Muñoz-Bonilla et al. 2014; Badawy y Rabea 2016; Divya y Jisha 2018) asocian esa propiedad ya que el quitosano es policatiónico y eso permite la interacción con las bacterias, las propiedades quelantes del quitosano lo vuelven un excelente agente antifúngico y su presencia actúa como defensa para las plantas. Se emplea generalmente para controlar enfermedades en las plantas derivadas de bacterias y hongos y para plagas y hongos (Divya y Jisha 2018; Grande-Tovar et al. 2018; Sharif et al. 2018).

Se conoce que el quitosano tiene efecto positivo en la tasa de germinación, parámetros de crecimiento de plántulas, y el rendimiento de diferentes cultivos. Sus bioactividades como actividad antifúngica, aumento del rendimiento de cultivos, inducción del sistema defensivo de las plantas, y promoción del crecimiento de las plantas juegan roles clave en su aplicación para la agricultura. En nuestro tratamiento empleado con quitosano hicieron notar sus propiedades, dando como respuesta positiva una sobrevivencia de las plántulas germinadas de aproximadamente cuatro meses y una semana de vida, siendo este tratamiento el que más éxito tuvo hablando de supervivencia. Las propiedades quelantes del quitosano pudo haber influido

grandemente en que la planta sobreviviera por más tiempo, ya que el jale contaminado tenía presencia de muchos metales pesados que posiblemente fueron atrapados e inmovilizados por el quitosano. En el proceso de germinación no fue lo más exitoso comparado con los demás tratamientos, es conocido que el quitosano es insoluble con el agua, por lo tanto, lo que pudo haber influido en que el agua no penetrara en la semilla y esto retrasar o eliminar la posibilidad de que se iniciara el proceso de germinación de las semillas, sin embargo, se destacó por su alto porcentaje de supervivencia.

Por otro lado, se empleó un tratamiento de control, en el cual no se le añadió ningún compuesto adicional, dando como resultado una baja tasa de germinación y supervivencia, lo que nos dice que, efectivamente el suelo del sitio no es capaz de poder establecer especies por los contaminantes presentes.

10. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que para las diferentes especies y tratamientos empleados en este trabajo varía la efectividad de germinación y supervivencia de semillas y plántulas. En las siguientes tablas (Tabla 23-26) se presenta el rango en el que se posiciona su efectividad, siendo evaluado del 1-4 su comportamiento, tomando en cuenta que 1 es lo más deficiente y 4 lo más eficiente.

Tabla 23. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie *Parkinsonia aculeata*.

Tratamientos	Germinación	Supervivencia
Fertilizante comercial	1	1
Suelo de jardín	4	2
Biochar	3	3
Qitosano	2	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie *Parkinsonia microphylla*.

Tratamientos	Germinación	Supervivencia
Fertilizante comercial	1	1
Suelo de jardín	3	2
Biochar	4	3
Quitosano	2	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie *Parkinsonia praecox*.

Tratamientos	Germinación	Supervivencia
Fertilizante comercial	1	1
Suelo de jardín	4	3
Biochar	2	2
Quitosano	3	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Rango de resultados en germinación y supervivencia de la especie *Neltuma juliflora*.

Tratamientos	Germinación	Supervivencia
Fertilizante comercial	1	1
Suelo de jardín	4	3
Biochar	3	2
Quitosano	2	4

Fuente: Elaboración propia.

Principalmente podemos destacar que la condición empleada de la escarificación manual fue exitosa ya que ayuda a acelerar el proceso de imbibición de la semilla e iniciar la germinación mucho más rápido a comparación de semillas con la testa completa. Adicionalmente a ello pudimos observar que los tratamientos de suelo de jardín y biochar tuvo un mayor éxito en el proceso de germinación, gracias a las propiedades que cada uno de ellos proporciona. Por otro lado, tenemos que la mayor efectividad en supervivencia fue el tratamiento de quitosano en todas las especies empleadas. Los diferentes tratamientos empleados si son de ayuda para poder recuperar el sitio de la presa de jales, ya que vimos que por sí solo no se podrá establecer vegetación por los contaminantes presentes.

11. RECOMENDACIONES

Como recomendación para la aplicación de este diseño experimental, se sugiere primeramente realizar la prueba de viabilidad y de esta forma asegurar que las semillas que se van a utilizar son las óptimas, al igual que la aplicación de la técnica de escarificación manual para garantizar un mayor porcentaje de germinación en las semillas plantadas.

Aplicar suelo de jardín o biochar en el suelo del jale contaminado para aprovechar los beneficios de estos y de esta manera lograr que la mayor cantidad de semillas escarificadas germinen, adicional a ello, dados los porcentajes de supervivencia obtenidos en el proyecto es recomendable utilizar el quitosano. Posiblemente este proyecto sea de ayuda para posibles investigaciones, en las que se podría emplear una mezcla de diferentes tratamientos para obtener mejor resultado tanto en la germinación como en la supervivencia de las plántulas germinadas, como por ejemplo podría ser el caso de aplicar quitosano con suelo de jardín o quitosano con biochar.

También, se podría multiplicar la cantidad de semillas plantadas para tener un mayor número de individuos y mayores probabilidades de establecimiento en el sitio de las presas de jales de la mina aleña a San Pedro de la cueva con ayuda de los diversos tratamientos empleados. Este trabajo experimental puede aplicarse en el campo para ver su efectividad ya que actualmente solo se llevó a cabo en el laboratorio y sería de suma importancia que este procedimiento se realizara días antes a la temporada de lluvias, a fin de asegurar que las plantas tengan la humedad suficiente para sobrevivir, también ahorrando recursos que podría implicar más costos para la empresa.

Debido a que esta metodología no había sido empleada anteriormente, es recomendable analizar diferentes especies con los tratamientos ya diseñados o una mezcla de ellos, para determinar cuál sería la que trae mejores resultados.

12. LITERATURA CITADA

1. Aguirre, R., & Peske, S. T. (1992). Manual para el beneficio de semillas. CIAT.
2. Amador Rosas, J. A. (2020). Fitorremediación aplicada a la recuperación de suelos en la tepetatera “Primavera” dentro de la Mina Pitalla en el municipio de La Colorada, Sonora. Tesis de Maestría en Sistemas de Producción Biosustentables. Universidad Estatal de Sonora.
3. Amador Rosas, J. A. y C. Domínguez Romo (2015). Determinación de la concentración de partículas biológicas (polen y esporas fúngicas) y no biológicas (PST) en la zona Norte de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Tesis de Licenciatura. Licenciatura en Ecología. Universidad Estatal de Sonora.
4. Bianco, L. y Cenzano, A. (Junio, 2018). Leguminosas nativas: estrategias adaptativas y capacidad para la fijación biológica de nitrógeno. Implicancia ecológica. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005002601>
5. Caro-León, F. J., López-Martínez, L. M., Lizardi-Mendoza, J., Argüelles-Monal, W., Goycoolea-Valencia, F. M., Carvajal-Millán, E., & López-Franco, Y. L. (2019). Métodos de preparación de nanopartículas de quitosano: una revisión. *Biotecnia*, 21(3), 13–25. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i3.1007>
6. Caughey-Espinoza, D. M. M., Ayala-Astorga, G. I., Burboa-Zazueta, M. G., Retes-López, R., & Ochoa-Meza, A. (2018). Uso de plantas nativas para la rehabilitación de canteras en Sonora. *Idesia (Arica)*, 36(4), 17-24. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005002401>
7. Cecon, E. (2014). Restauración en bosques tropicales: Fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. España: Ediciones Díaz de Santos.
8. Chan-Quijano, J. G., Cach-Pérez, M. J., Cach-Pérez, M. J., López-Mejía, M., & López-Mejía, M. (2021). Especies vegetales con uso potencial en la remediación de zonas contaminadas en México. *Revista forestal del Perú*, 36(1), 22. <https://doi.org/10.21704/rfp.v1i36.1703>
9. Chioc, A. (2014). Cultivo de pacaina (entrevista). San Pedro Yepocapa, Chimaltenango, Guatemala. Asociación Nacional del Café.
10. Da Silva, R. O. S. (2023). Deposito de agroquimicos, fertilizantes y semillas.

11. Dirección General de Desarrollo Minero (Mayo, 2022). Etapas del proceso productivo para la pequeña y mediana minería.
12. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2013, 13 de septiembre). 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 postoperación de presas de jales.
13. Escalante, J. J. S. Plantas nativas de Sonora: las plantas del desierto sonoreño.
14. Estrada Robles, G. C. (2021). Germinación de frijol y chile sobre jales mineros aplicando zeolita y composta.
15. Espinosa-Cavazos, K. G., Sáenz-Galindo, A., & Castañeda-Facio, A. O. (2020). Películas de quitosano propiedades y aplicaciones. *Afinidad*, 77(591).
16. Ezcurra-Exequiel, et.al 1994. Los Desiertos de Sonora y Baja California. Recuperado el 9 de Septiembre de 2015, recuperado de <http://www.inecc.gob.mx/publicaciones/download/368.pdf>
17. Ferrari, A. E., & Wall, L. G. (2004). Utilización de árboles fijadores de nitrógeno para la revegetación de suelos degradados. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 105.
18. Gamboa, A. (Abril, 2019). En Sonora 56 plantas en riesgo de extinción por exploraciones mineras, ampliación de carreteras y desarrollos turísticos. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICTUS UNISON).
19. Gilces Reyna, M. A. (2014). Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo.
20. Giraldo, J. (2015). Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano. *Appl. Chitosan*.
21. González-Valdez, E. Germinación y tolerancia de cinco especies vegetales sembradas en residuos mineros: implicaciones para la fitorremediación.
22. Gonzalez, D. A. M. (2020). Caracterización de especies vegetales para fitorremediar suelos contaminados con metales pesados en jales mineros.
23. Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D.,

- Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(2), 109-114.
24. Hernández Cocoletzi, H., Águila Almanza, E., Flores Agustin, O., Viveros Nava, E. L., & Ramos Cassellis, E. (2009). Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón. *Superficies y vacío*, 22(3), 57-60.
25. Herrera Carvajal, H. (Junio, 2008). Etapas en la vida de un proyecto minero. Gerentede Proceso Proyecto Pascua-Lama, Barrick Chile.
26. INEGI. Censos Económicos 2019.
27. Item 1025/473. (2018, mayo 11). Repositorioinstitucional.mx. <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/473>
28. Jara N., L. F. (1997). Secado, procesamiento y almacenamiento de semillas forestales. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Programa de Investigaciones, Proyecto de Semillas Forestales.
29. JR, J. A., Rodríguez, M. A., Cepeda, R. V., & Invesigador, C. (2001). Escarificación de semillas de mezquite (*Prosopis laevigata*) para aumentar la eficiencia en la germinación.
30. Loyola Saavedra, I. R., & Ochoa Miguel, J. J. (2021). Biochar de biomasa residual por Pirólisis Lenta para la germinación y crecimiento de la semilla del *Prosopis limensis* en el distrito de Cieneguilla.
31. Mármol, Z., Páez, G., Rincón, M., Araujo, K., Aiello, C., Chandler, C., & Gutiérrez, E. (2011). Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. *Revista Tecnocientífica URU*, 1(3), 53-58.
32. Márquez-Huitzil, R., Martínez-Garza, C., & Osorio Beristain, M. (2022). Adoptar los objetivos de la restauración ecológica como meta crucial al mitigar desechos mineros: una propuesta metodológica. *Acta botánica mexicana*, (129).
33. Minería y Geología. (s/f). Redalyc.org. Recuperado el 30 de mayo de 2024, de <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223532481006.pdf>

34. Montes Rocha, J. Á. (2016). Efecto de los metales pesados en suelo de jales mineros de San Luis Potosí. Tesis ubicada en la Mediateca del Centro de Información en Ciencias Biomédicas (CICBI).
35. Morales, A., & Domas, M. (n.d.). Guía metodológica de cierre de minas <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/766a85c7-5ac4-4cd4-874a-f06c6c2060c6/content>
36. Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., & Crini, G. (2019). Applications of chitosan in food, pharmaceuticals, medicine, cosmetics, agriculture, textiles, pulp and paper, biotechnology, and environmental chemistry. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1667-1692.
37. Nieto Martín, A. (2015). *Fabricación, caracterización y utilización de biochar como sustituto de la turba en la preparación de sustratos de cultivo* (Doctoral dissertation, Industriales).
38. Oa, D. E. H. (2007). Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, España. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/pdf/540/54016206.pdf>
39. Orsag, V. Bolivia productor de fertilizantes químicos: consideraciones para el uso eficiente, efectivo y ambiental sostenible.
40. Ortega Rosas, C. I., Martínez Salido, J., Sánchez Duarte, N. E., & Morales Romero, D. (2022). Cobertura y composición arbórea en las áreas verdes de Hermosillo, Sonora: aportaciones al urbanismo sustentable. *región y sociedad*, 34, e1610. <https://doi.org/10.22198/rys2022/34/1610>
41. Palafox Luna, C. (Febrero, 2018). El yacimiento La Colorada, Sonora, México: Evidencias de un sistema epitermal oligoceno-mioceno superpuesto a un sistema pórfido de Cu-Mo laramídico. Universidad de Sonora.
42. Pabón, S., Benítez, R., Sarria-Villa, R., & Gallo, J. (n.d.). Entre Ciencia E Ingeniería, 14(27), 9–18. <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>
43. Pineda Espinoza, D. D. R. (2020). Incidencia de microorganismos benéficos inmovilizados en biochar sobre la germinación de las semillas de arveja (*Pisum sativum*).

44. Ramos-Arroyo, Y. R., Siebe-Grabach, C. D. (2006). Estrategia para identificar jalescon potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1).
45. Rojas Pérez, T. (2017). *Uso del biochar para mejorar la calidad de plantas de café (Coffea arabica)* (Master's thesis).
46. Velásquez, C. L. (2008). Algunas potencialidades de la quitina y el quitosano para usos relacionados con la agricultura en Latinoamérica. *Revista UDO Agrícola*, 8(1), 1-22.
47. Vásquez Flores, X. A. R. E. N. I. (2024). Alternativa de uso de quitosano y nanopartículas de plata en el cultivo in vitro EN *Tillandsia ionantha* Planch.”.
48. Vergara, Miguel; *Cianuro: ¿preocupación o prejuicio?*; diario Río Negro; General Roca (Pcia. de Río Negro); 7 de mayo de 2010.
49. Vilela Pincay, W., Espinosa Encarnación, M. y Bravo González, A. (Noviembre, 2020) La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. DOI: <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.8>

13. ANEXOS



Figura 27. Monitoreo de crecimiento de vainas Palo verde.

Fuente: Imagen propia.



Figura 28. Monitoreo de crecimiento de vainas de mezquite.

Fuente: Imagen propia.



Figura 29. Escarificación manual de semillas.
Fuente: Imagen propia.



Figura 30. Semilla escarificada manualmente.

Fuente: Imagen propia.



Figura 31. Resultado de prueba de viabilidad.

Fuente: Imagen propia.



Figura 32. Crecimiento de palo verde en tratamiento suelo de jardín.

Fuente: Imagen propia.



Figura 33. Crecimiento de mezquite en tratamiento suelo de jardín.

Fuente: Imagen propia.