

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Evaluación de la viabilidad aplicativa de la fitorremediación en relaves
mineros a partir de plantas de sembrío tradicionales.**

Caso: Quebrada Corte Ladrones – Perubar, Corcona (Perú)”

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA DE MINAS**

AUTORES

Diego Ernesto Astuyauri Rosado
Christian Ronaldo Pulcha Villalobos

ASESOR:

Ernesto Osvaldo Aduvire Pataca

Lima, diciembre, 2020

RESUMEN

La minería es una actividad extractiva que se ha desarrollado desde hace miles de años, como sector es parte del desarrollo de las naciones y es parte de la evolución tecnológica, minerales como el cobre y el oro son indispensables para la conectividad global y construcción de infraestructura necesaria para el desarrollo de las actividades humanas en las épocas actuales. Lastimosamente la minería no siempre fue regulada como ahora, y la concepción de la idea de “desarrollo sostenible” no es muy antigua, razones por la cual existen una gran cantidad de labores mineras abandonadas, entre ellas relaveras que su sola presencia generan una variación en el sistema físico, químico, biológico, etc. de su entorno.

Un caso de una relavera sin las condiciones de cierre adecuadas es la que actualmente se encuentra en el desfogue de la quebrada Corte Ladrones, Corcona, Huarochirí. Y si las condiciones del problema no fueran suficientes, algunos pobladores empezaron a asentarse sobre los terrenos contaminados, exponiendo su salud y seguridad. Ante la situación, el presente proyecto de investigación busca encontrar una posible solución a este problema con el desarrollo piloto de un estudio de fitorremediación.

La fitorremediación es una tecnología que viene siendo investigada en diferentes partes del mundo, es dependiente de muchas variables, pero su bajo costo y adaptabilidad son ventajas que sustentan el desarrollo de un estudio de su factibilidad en la quebrada Corte Ladrones.

Se dio inicio al presente trabajo de investigación evaluando la capacidad remediadora, así como el correcto desarrollo físico de las plantas conocidas comúnmente como cosmos y dogo. El experimento tuvo su desarrollo y aplicación a condiciones similares en presión, temperatura de la zona en cuestión que se realizó la recolección de muestras. Asimismo, el tiempo de aplicación de la tecnología fue de dos meses para los cuales se obtuvieron resultados prometedores.

Como resultado del presente trabajo de investigación se obtuvo que la planta óptima para realizar el proceso de fitorremediación en la zona “Quebrada Corte Ladrones” es el dogo, debido a su porcentaje fitorremediador y a su capacidad de adaptarse a distintas condiciones de contenido mineral y aun así soportar y tener un desarrollo físico estable y correcto.

AGRADECIMIENTOS

El avance y desarrollo del presente trabajo de investigación ha sido el logro del amor, esfuerzo y dedicación de nuestros padres que formaron los profesionales de hoy. Su apoyo, no solo fue parte de nuestra formación sino un involucramiento participativo en el desarrollo del proyecto para superar las limitaciones no solo comunes, sino también las impuestas debido a la pandemia por el Covid-19.

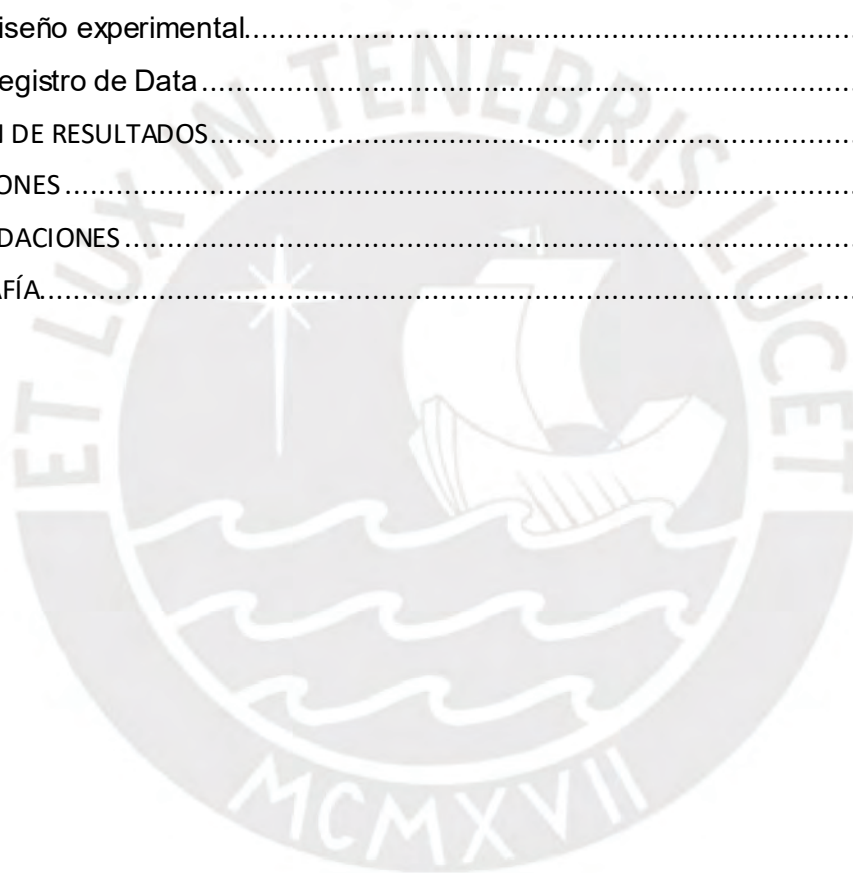
Gracias a nuestro asesor Dr. Ing. Osvaldo Aduvire por su constante apoyo y motivación, que a pesar de las condiciones adversas para realizar un trabajo de investigación aplicativo fue parte clave para dirigirnos en el desarrollo del proyecto. A la profesora, Dra. Maribel Guzmán y la Lic. Claudia Toledo por su apoyo en la gestión y desarrollo del proyecto.

Gracias a Dios por permitirnos estar aquí, por la vida que nos da la oportunidad de presentar este trabajo de investigación. Asimismo, a los que confiaron, apoyaron y creyeron en nosotros.

ÍNDICE

1. INTRODUCCION.....	9
1.1. Antecedentes.....	9
1.1.1. Nacionales.....	9
1.1.2. Internacionales.....	11
1.2. Justificación	13
1.3. Hipótesis	14
1.4. Objetivos.....	14
1.4.1. General.....	14
1.4.2 Específicos	14
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Relaves Mineros.....	15
2.1.1. Fuente de origen de los relaves mineros.....	16
2.2. Metales pesados.....	17
2.2.1. Plomo	18
2.2.2. Cadmio	20
2.3. Contaminación del Suelo	22
2.3.1. Origen de contaminación del suelo.....	22
2.3.2. Fuentes de contaminación del suelo.....	23
2.3.3. Principales contaminantes del suelo.....	24
2.3.5. Movilización de los contaminantes en el suelo	25
2.4. Legislación Ambiental.....	26
2.4.1. Legislación sobre suelos	27
2.4.2. Legislación sobre pasivos ambientales.....	29
2.4.3 Legislación sobre relaves.....	30
2.5 Recuperación sobre suelos contaminados	31
2.5.1 Técnicas de contención.....	31
2.5.2 Técnicas de confinamiento.....	31
2.5.3 Técnicas de descontaminación.....	32
2.6. Fitorremediación.....	33
2.6.1. Técnicas de fitorremediación.....	33
2.6.2 Fitoextracción, especies vegetales estudiadas.....	35
3. ASPECTOS GENERALES.....	36
3.2 Ubicación Geográfica	37
3.3 Tipo de Geología	38
3.4 Clima y Precipitación.....	39

3.5 Operaciones Mineras	39
4. PARTE EXPERIMENTAL.....	40
4.1 EXPERIMENTO DE SELECCIÓN.....	40
4.1.1 Metodología	40
4.1.2 Diseño y construcción de recipientes para selección.....	42
4.1.3 Diseño experimental.....	49
4.1.4 Registro de Data	52
4.2 EXPERIMENTO DE FITORREMEDIACIÓN.....	54
4.2.1 Metodología	54
4.2.2 Diseño y construcción de recipientes para fitorremediación.....	57
4.1.3 Diseño experimental.....	62
4.1.4 Registro de Data	65
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	72
7. CONCLUSIONES	84
8. RECOMENDACIONES.....	86
9. BIBLIOGRAFÍA.....	87

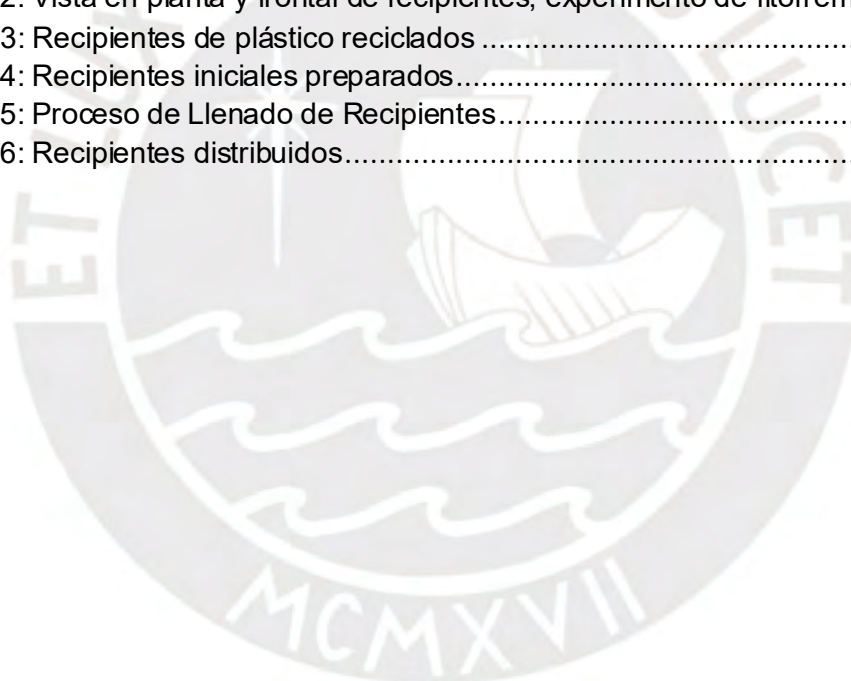


INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sobre porcentaje de remoción de Arsénico y Zinc con Brassica Juncea (Mostaza)	10
Tabla 2: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo	28
Tabla 3: Coordenadas y elevación de zona de estudio, Quebrada Corte Ladrones	37
Tabla 4: Calculo de densidad Relave, Muestra 1	47
Tabla 5: Calculo de densidad Relave, Muestra 2	47
Tabla 6: Calculo de densidad Relave, Muestra 3	47
Tabla 7: Calculo de densidad Relave, Muestra Humus Real	47
Tabla 8: Distribución de Masas para Muestra 1, 2 y 3, experimento de selección	48
Tabla 9: Sobre las plantas a estudiar en el experimento de selección	49
Tabla 10: Parámetros y sistema de evaluación por parámetros para Análisis Cualitativo. Experimento de selección.	51
Tabla 11: Sobre el registro de condiciones finales (evaluación cualitativa) para la Muestra 1	52
Tabla 12: Sobre el registro de condiciones finales (evaluación cualitativa) para la Muestra 2	53
Tabla 13: Sobre el registro de condiciones finales (evaluación cualitativa) para la Muestra 3	53
Tabla 14: Sobre las valoraciones finales (evaluación cualitativa) por planta	53
Tabla 15 Distribuciones de Relave- Hummus por envase:	58
Tabla 16: Sobre los volúmenes esponjados finales y material requerido para cada recipiente:	61
Tabla 17: Características Cosmos Bipinnatus y Antirrhinum	62
Tabla 18: Listado de parámetros cualitativos, experimento de fitorremediación	63
Tabla 19: Listado de parámetros cualitativos, experimento de fitorremediación	64
Tabla 20: Condiciones iniciales del Relave	65
Tabla 21: Evaluación de parámetros cualitativos al mes, Cosmos	66
Tabla 22: Evaluación de parámetros cuantitativos al mes, Cosmos	66
Tabla 23: Evaluación de parámetros cualitativos al mes, Dogo	67
Tabla 24: Evaluación de parámetros cuantitativos al mes, Dogo	67
Tabla 25: Evaluación de parámetros cualitativos a los dos meses, Cosmos	68
Tabla 26: Tiempo de Germinación-Brote de Semilla y Muerte de plantas, Cosmos	69
Tabla 27: Evaluación de parámetros cuantitativos a los dos meses, Cosmos	69
Tabla 28: Evaluación de parámetros cualitativos a los dos meses, Dogo	70
Tabla 29: Tiempo de Germinación-Brote de Semilla y Muerte de plantas, Dogo	70
Tabla 30 : Evaluación de parámetros cuantitativos a los dos meses, Cosmos	71
Tabla 31: Sobre el requerimiento de agua por planta	71

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Rutas de movilización de los contaminantes presentes en un suelo contaminado.....	25
Ilustración 2: Sobre la representación de las técnicas o mecanismos de fitorremediación..	34
Ilustración 3: Ubicación de la Quebrada Corte Ladrones.....	37
Ilustración 4: Formaciones que conforman la Quebrada Corte Ladrones.....	38
Ilustración 5: Medidas de los vasos a utilizar como recipientes de las muestras	42
Ilustración 6: Posición de las muestras según zona de extracción.....	44
Ilustración 7:: Muestra 1, referido a zona de alta concentración de pirita	45
Ilustración 8: Muestra 2, referido a la quebrada en sí misma, zona de con DAM producido por lluvias temporales.....	45
Ilustración 9: Muestra 3, referido a zona de materiales combinados entre relave y residuos sólidos de la población asentada.....	45
Ilustración 10: Distribución de semillas de Cosmos, experimento de fitorremediación	55
Ilustración 11: Distribución de Semillas de Dogo, experimento de fitorremediación.....	56
Ilustración 12: Vista en planta y frontal de recipientes, experimento de fitorremediación	57
Ilustración 13: Recipientes de plástico reciclados	58
Ilustración 14: Recipientes iniciales preparados.....	59
Ilustración 15: Proceso de Llenado de Recipientes.....	59
Ilustración 16: Recipientes distribuidos.....	60



INDICE DE GRÁFICAS

Gráficas 1: Evolución del número de plantas por cada distribución, Cosmos	72
Gráficas 2: Evolución del tamaño de hojas por cada distribución, Cosmos	73
Gráficas 3: Evolución de la altura de las plantas por cada distribución, Cosmos.....	73
Gráficas 4: Evolución del grosor de tallo de las plantas por cada distribución, Cosmos.....	74
Gráficas 5: Evolución del radio de influencia por planta por cada distribución, Cosmos	74
Gráficas 6: Evolución de la longitud de las raíces de las plantas por cada distribución, Cosmos	75
Gráficas 7: Evolución del número de plantas por cada distribución, Dogo	76
Gráficas 8: Evolución del tamaño de hojas por cada distribución, Dogo	76
Gráficas 9: Evolución de la altura de las plantas por cada distribución, Dogo	77
Gráficas 10: Evolución del grosor de tallo de las plantas por cada distribución, Dogo	77
Gráficas 11: Evolución del radio de influencia por planta por cada distribución, Dogo.....	78
Gráficas 12: Evolución de la longitud de las raíces de las plantas por cada distribución, Dogo	78
Gráficas 13: Evolución del pH, matriz comparativa entre distribución por meses y plantas.	80
Gráficas 14: Presencia de metales pesados-Plomo, comparativa inicial-final fitorremediación, Cosmos.....	80
Gráficas 15: Presencia de metales pesados-Plomo, comparativa inicial-final fitorremediación, Dogo	81
Gráficas 16: Presencia de metales pesados-Cadmio, comparativa inicial-final fitorremediación, Cosmos.....	81
Gráficas 17: Presencia de metales pesados-Cadmio, comparativa inicial-final fitorremediación, Dogo	82
Gráficas 18: Tendencia de comportamiento, comparativa Dogo y Cosmos para remediación de Plomo.....	82
Gráficas 19: Tendencia de comportamiento, comparativa Dogo y Cosmos para remediación de Cadmio.....	83

1. INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

1.1.1. Nacionales

La fitorremediación ha sido observada como una metodología de estudio por múltiples investigadores. La idea ha ido evolucionando, más aún esta tecnología no tiene muchos años de sus primeros estudios. En el Perú, por la misma existencia de una gran cantidad de pasivos mineros, la fitorremediación se vuelve una actividad viable. Uno de estos estudios es el trabajo titulado “Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros” (Mur, 2018), donde se analiza los metales tóxicos: U, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe, Ni y Se con el uso de las plantas: Vilco (*Acacia visco*), C’olle (*Buddleja coriácea*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), Mioporo (*Myoporum laetum*), Quinual (*Polylepis racemosa*) y Molle (*Schinus molle*). Este estudio reveló que uno de los criterios de caracterización más críticos fue el pH, ya que su variación fue muy alta, reduciendo abruptamente la acidez, en excepción del molle, planta que no generó variaciones muy notorias en el pH. Este estudio analizó muestras con 20% y 50% de relaves, donde el porcentaje de metal removido no varía mucho entre ambos tipos de muestras. Además, existe cierta afinidad, observable en los resultados, entre algunas plantas para remover ciertos metales, caso del eucalipto con el cobre y el quinual con el antimonio.

Un segundo caso de estudio es el titulado; “Evaluación del Potencial Fitorremediador de la especie *Brassica Juncea* (Mostaza) en suelos contaminados con zinc y arsénico provenientes de relaves mineros”, publicado el año 2019 (Valverde Vasquez & Rebaza Paredes, 2019). A diferencia del primer caso, este es un estudio en base a una sola planta, la Mostaza, y la variable de análisis, aquí se aplica principalmente a la relación relave y materia agrícola, se puede observar ello en la Tabla 1. Un punto calve aquí es la cantidad de relave a utilizar vs la eficiencia del procedimiento. Básicamente se obtiene que, si para la planta se aumenta su % de relaves, la eficiencia del procedimiento empeora. Este punto es importante porque uno de los indicadores de un buen procedimiento es conseguir resultados al menor tiempo posible, reconociendo las condiciones subyacentes.

Tabla 1 Sobre porcentaje de remoción de Arsénico y Zinc con Brassica Juncea (Mostaza)

%Relaves	Test	Remoción As (%)	Remoción Zn (%)
0	T0	0	0
20	T1	42.98	27.85
40	T2	49.47	18.08
60	T3	39.77	15.52

Los trabajos de investigación sobre fitorremediación se han aplicado en muchos lugares del mundo y de nuestro país, Corcona, el anexo donde se encuentra el Relave de estudio también fue lugar de algunos proyectos de investigación. Uno de estos trabajos fue, “Fitorremediación de los relaves mineros de Perubar (Unidad minera Graciela) por medio de girasol (*Helianthus annuus*)”, realizado durante 60 días en el año 2017. Este estudio no trabaja con diferentes porcentajes como otros estudios sino con diferentes materiales orgánicos, aserrín y humus, y un ejemplar sin material orgánico. El estudio evidenció que las mejores condiciones del suelo, ósea que la presencia de humus frente a otros materiales ayudo mucho a la evolución de las plantas y por ende a la extracción de metales, mientras que en el suelo con solamente relave el eucaliptus logro germinar, pero su extracción fue mínima (Ibarra Supanta et al., 2017).

Otro trabajo sobre fitorremediación en Corcona fue “Fitoextracción de cadmio en el suelo por medio del cultivo de cosmos (*Cosmos bipinnatus*), del distrito de Corcona, Huarochirí 2017”. Como ya se presentó ciertas características y variables en otros antecedentes, este estudio nos brinda una información extra sobre el proyecto. El trabajo realizo la metodología de fitorremediación con Cosmos, trabajando con diferentes puntos de análisis en las zonas con presencia de minerales dispersados, que va más allá de solo la zona de relaves. En sus estudios se identifica que la zona con mayor concentración de metales tóxicos es en el punto identificado en la quebrada Corte Ladrones (Muga P., 2017)

1.1.2. Internacionales

Con respecto a los antecedentes internacionales se encuentra el trabajo titulado como “Phytoremediation in New Zealand and Australia”, fue elaborado por Brett Robinson y Chris Anderson, en el año 2007. Dicho trabajo explica el porqué de la gran cantidad de áreas verdes en estos países, así como que entre las tecnologías más utilizadas de remediación tanto de actividades mineras, actividades de tratamiento de químicos para la madera como actividades industriales es la fitorremediación, debido a su fácil implementación, a su bajo costo y a sus resultados óptimos en remoción o extracción de metales pesados (Robinson & Anderson, 2007). Por otro lado, se mencionan un par de casos de éxitos de usos de esta tecnología:

- Caso 1: Se menciona un hecho desafortunado que se produjo debido al derrame de una poza de lixiviación (en la industria de la madera, se trabajaban con aditivos de cobre y cadmio para evitar que la madera se oxide), pero a partir de este hecho, se inició la tecnología de remediación en la zona utilizando plantas del lugar, obteniendo como resultado de este, extracción de metales pesados en el suelo, remediación del suelo, aumento de áreas verdes, inmovilización de los metales pesados en el suelo.
- Caso 2: Se menciona que se encontraban implementando la tecnología de fitorremediación en una zona donde muchos turistas, transitaban o lo utilizaban para acampar y que años atrás allí existió actividad minera y relaves depositados. Lo que se buscó fue que, a partir de la plantación de pinos, se lograra remediar el suelo (fitoextracción de metales pesados), así como la inmovilización de los metales pesados en el suelo y mejorar tanto las condiciones medio ambientales como las visuales.

En el mismo marco de antecedentes internacionales, encontramos el trabajo de tesis titulado “Determinación de la capacidad fitorremediadora de cadmio del camacho (*Xanthosoma undipes* Koch) especie vegetal nativa en el área de influencia de EP Petroecuador en el distrito amazónico” realizado por Jorge Javier Muso Cachumba en el año 2012. En el presente trabajo, se explica que la zona evaluada presentaba concentraciones de cadmio que superaban el límite permitido para dicho lugar, motivo por el cual se desarrollaron dos experimentaciones, la primera de ellas a nivel vivero y la segunda a nivel piloto. Para el primer experimento a nivel vivero, se siguieron los siguientes pasos: Se sometió el análisis a concentraciones de cadmio de 0,20,40,60 ppm por un tiempo de exposición de 60 y 120 días, la planta utilizada para la fitorremediación fue el camacho y como resultado obtenido

fue una remoción del cadmio de 79.671%. Para el experimento piloto en campo se siguieron los siguientes pasos: Se sometió el análisis a concentraciones de cadmio de 15 ppm por un tiempo de exposición de 90 días, utilizando las plantas de camacho, maíz, girasol, dalis para aplicar la fitorremediación y como resultado se obtuvo una remoción de 59.879% para el experimento utilizando maíz y una remoción de 55.17% utilizando camacho. Se puede observar que la tecnología para el metal pesado cadmio da buenos resultados, se podría mejorar la capacidad remediadora, teniendo una mayor gestión en el crecimiento y desarrollo de las plantas fitorremediadoras (Musso Cachumba, 2012).

De manera similar, en antecedentes internacionales encontramos el trabajo de tesis titulado "Tendencias en los trabajos de investigación del tema de fitorremediación" realizado por Jocabel Extocapan Molina en el año 2017. En el presente trabajo, se explica que en los procesos que implican tecnología de fitorremediación en su mayoría están abocados a trabajar con los siguientes contaminantes (metales pesados): Pb, Cd, As, Zn y Cu. Además, detalla que la mayoría de los ensayos realizados a esta tecnología han sido a nivel de laboratorio o vivero, que la aplicación a nivel macro, o nivel industrial es muy poca. Como conclusión de este trabajo se llega a que la tecnología aún se encuentra en proceso, en desarrollo para niveles a gran escala (Extocapan Molina, 2017).

1.2. Justificación

El presente trabajo encuentra su justificación en los siguientes incisos:

- **ECONÓMICO**

- ❖ Tecnología ambiental de bajo costo de implementación.
- ❖ Fomentar la aplicación a nivel macro (industrias mineras).

- **TÉCNICO**

- ❖ Comprobar si se obtiene un alto porcentaje de remediación de suelos a partir de la tecnología de fitorremediación.
- ❖ Comprobar si se obtiene un alto porcentaje de extracción de metales pesados a partir de las plantas seleccionadas.

- **SOCIAL**

- ❖ Prevención de contaminación hacia personas que se encuentran asentándose en la zona (modalidad de “invasión de terrenos”).
- ❖ Mejorar el suelo de la zona para que los pobladores puedan utilizarlo para criaderos de animales, y sembrío de vegetales, otros.

- **AMBIENTAL**

- ❖ Reducción de contaminantes en el suelo producto de metales pesados en la zona.
- ❖ Reducción de contaminantes en la cadena trófica.

1.3. Hipótesis

Se generará una disminución significativa entre el 60% - 80% en la concentración de metales pesados tanto de cadmio como plomo en el relave de la zona quebrada corte ladrones a partir de la aplicación de la fitorremediación utilizando plantas étnicas.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Analizar la viabilidad técnico económica del proceso de fitorremediación en el relave minero ubicado en la quebrada Corte Ladrones - Perú, basado en el monitoreo de reducción de la presencia de metales pesados en el medio, así como el estrés oxidativo generado en las plantas a trabajar.

1.4.2 Específicos

- Determinar las condiciones necesarias para los ensayos de fitorremediación.
- Analizar el porcentaje de reducción de la presencia de metales pesados en el relave minero.
- Analizar la viabilidad de la fitorremediación como opción para el proceso de cierre minero.
- Desarrollar un proyecto que ayude a reducir los niveles de contaminación en una zona con población asentándose en la modalidad de invasión.
- Analizar cuanta área será revegetada, así como el costo de implementación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Relaves Mineros

Existen algunas definiciones otorgadas a relaves mineros, a continuación, se mencionan:

- Se define el termino de relaves como el desecho mineral (de características sólidas) que cuenta con tamaño en un rango entre arena y limo, que son obtenidos de los procesos de concentración de minerales y que son producidos, transportados o depositados en forma de lodos (Ministerio de Energía y Minas-Perú, 2005).
- Suspensión fina de sólidos en líquido, constituidos fundamentalmente por el mismo material presente in situ en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, conformando una pulpa, que se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y estériles que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina; esta "pulpa o lodo de relaves" fluctúa en la práctica con una razón aproximada de agua/sólidos que van del orden de 1:1 a 2:1 (N. Ramírez, 2007).
- Suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda final (Servicio de Evaluación Ambiental Chile, 2020).

En la actualidad, los relaves tienen una alta presencia en el mundo minero-metalúrgico debido al incremento del tratamiento de concentración (chancado-molienda) que recibirán los minerales, lo cual se encuentra altamente ligado al aumento en el número de proyectos e incremento de producción mineral; como consecuencia y tanto a nivel legal, social como nivel ambiental dichos relaves deben tener una disposición adecuada para mitigar su impacto. Dentro de las disposiciones que se tienen para relaves, están:

- Disposición de almacenamiento superficial: Vinculado a la construcción de presas de relave para su respectivo almacenamiento.

Presa de relave: Este tipo de depósito de relaves consiste en construir un muro resistente hecho totalmente de material de empréstito, compactado e impermeabilizando el talud interior del muro y también parte o todo su coronamiento; los relaves se depositan completos en la cubeta sin necesidad de clasificación, pero también deben disponer, de un sistema de evacuación de las aguas claras de la laguna que se forma (N. Ramírez, 2007).

Tipos de presa de relave:

- ❖ Presas Aguas Arriba
 - ❖ Presas Aguas Abajo
 - ❖ Presas de línea central
- Disposición de almacenamiento subterráneo: Utilización de los relaves para relleno en interior mina.

Relleno interior mina: los relaves pueden ser utilizados dentro de una economía circular para la elaboración tanto de relleno hidráulico como relleno en pasta, los cuales tendrán la función de rellenar los grandes vacíos que deja la extracción de mineral para así mejorar las condiciones geomecánicas de la labor, es decir, brindar estabilidad a los tajos e inclusive para agilizar y mejorar el ciclo de minado (creando pisos que servirán para seguir con el proceso de perforación- voladura-acarreo de niveles superiores).

2.1.1. Fuente de origen de los relaves mineros

Una vez realizado el proceso de explotación del material mineral y siguiendo con la cadena de valor de un negocio minero este material es transportado a las plantas de concentración donde se aplicarán procesos tanto de chancado y molienda en los cuales se busca triturar y moler la roca para separar el mineral de interés de esta. Además, para ir aumentando la recuperación del mineral de interés, se aplican otros métodos como la lixiviación (óxidos) y flotación (sulfuros) los cuales dependen de si es un óxido o un sulfuro el material tratado, dichos procesos de beneficio implican la utilización de reactivos, agua, aire. El restante del material chancado, molido y tratado es lo que se conoce como relave minero, y para el cual debemos disponerlo en ubicaciones estratégicas y acondicionas correctamente.

2.2. Metales pesados

Para explicar el tema referido a metales pesados se encontraron las siguientes definiciones:

- Grupo de elementos metálicos que cuentan con las siguientes propiedades físicas: alta reflectividad, alta conductividad térmica, alta conductividad eléctrica, así como presenta propiedades mecánicas de fuerza y ductilidad (Reyes-navarrete et al., 2007).
- Refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones bajas (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2017).
- Grupo de elementos químicos que tienen una densidad mayor de 4 g/cm³ a 7 g/cm³. El término siempre suele estar relacionado con la toxicidad que presenta. Dentro de los metales pesados hay dos grupos: los micronutrientes que son necesarios en pequeñas cantidades para los organismos, pero tóxicos una vez pasado cierto umbral, incluyen: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn; y los metales pesados sin función biológica conocida que son altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos: son principalmente Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb y Bi (Herrera Flores, 2019).

Los metales pesados se encuentran distribuidos dentro de la corteza terrestre, ya sea como componentes de sales, compuestos o minerales; también pueden ser emitidos al medio ambiente producto tanto de la actividad minera como de la actividad industrial. Para el caso de los metales pesados emitidos por fuentes antropogénicas (impacto generado por el ser humano hacia el ambiente), encontramos que estos son liberados al medio ambiente en forma de material particulado; así mismo dentro del rubro minero como el rubro industrial se producen efluentes líquidos que son liberados al mar, ríos o lagos que si no reciben el tratamiento correspondiente de remediación una vez descargados generaran el transporte y dispersión de partículas de metales pesados.

Por otro lado, es conocido que dichos metales tienen una nula capacidad para ser destruidos o degradados, motivo por el cual a lo largo del tiempo estos van a poder ir acumulándose tanto en organismos vivos como en suelos, agua, entre otros, causando daño tanto en la salud humana como en la salud ambiental.

Para la elaboración del presente proyecto de tesis se va a trabajar en base al análisis de dos metales pesados muy representativos, como es el caso de plomo y el cadmio, los cuales se describen brevemente a continuación:

2.2.1. Plomo

Dentro de las definiciones otorgadas para el término de plomo encontramos:

- Es un metal pesado, blando, resistente a la corrosión, de color gris azulado, que se oscurece rápidamente con el aire, teniendo como punto de ebullición los 1740°C, emitiendo vapores a partir de los 550°C. No es un metal biodegradable (Burgel & Pose Román, 2010).
- Es un xenobiótico que no es necesario para el organismo humano, para ninguna función fisiológica conocida, pero sus efectos adversos inciden sobre diferentes procesos bioquímicos esenciales, e incluso es tóxico a bajo niveles de exposición. Si se encuentra en nuestros líquidos biológicos y órganos es porque ha ingresado desde el ambiente exterior. Este metal pesado, se encuentra de forma natural en la corteza terrestre y distribuida en el ambiente, debido a fuentes fijas o móviles contaminantes antropogénica o naturales (Rodríguez Rey et al., 2016).

El plomo es muy requerido dentro de las industrias humanas, claro ejemplo es que dicho metal es utilizado para: manufactura de tuberías, fabricación de cerámicas, ingrediente dentro de aleaciones para soldadura, plástico, para la elaboración de municiones en la industria militar, para la industria de la pintura y para la elaboración de cables eléctricos, entre otros. Debido a la demanda del plomo, es que la industria minera interviene en procesos de explotación extracción de minerales de plomo, dentro de los cuales encontramos:

- Galena (sulfuro de plomo - mineral de donde más se extrae el plomo)
- Cerusita (Carbonato de plomo)
- Anglesita (Sulfato de plomo)
- Otros

Por otro lado, es muy conocido que el plomo es un metal pesado de alta presencia en la tierra, y se encuentra catalogado dentro de uno de los contaminantes mayores del ambiente. La contaminación no está limitada solo a los trabajadores expuestos al plomo, también se extiende a la población en general; o sea, a la población expuesta a la contaminación ambiental de este metal por las diferentes rutas de exposición (aire, suelo y agua) (Rodríguez Rey et al., 2016). Se conoce que el plomo es altamente dañino para la salud humana y puede entrar en contacto con ella a partir de las siguientes vías de adsorción:

- Respiratoria
- Digestiva
- Dérmica

Una vez dentro del sistema humano, los problemas o efectos que se podrían desencadenar a partir de la exposición a altas concentraciones de plomo son los siguientes:

- **Efectos neurológicos:** En el caso de los niños, la exposición aguda, continua a dosis altas de plomo puede desencadenar en encefalopatía, con la presencia de ataxia, convulsiones, hiperirritabilidad, estupor, coma y muerte. La exposición al plomo está asociada con otros problemas disminución de la atención con hiperactividad, sordera, alteraciones del balance y de los nervios periféricos. Algunos de estos persisten en edad adulta (Poma, 2016).
- **Efectos renales:** Una exposición severa por un periodo breve se la asocia con alteraciones reversibles. Sin embargo, exposiciones continuas o repetidas pueden conducir a nefropatía crónica (nefritis intersticial), que es generalmente irreversible. La exposición al plomo también puede causar hipertensión arterial de origen renal. Con la disminución de la función renal, la excreción de ácido úrico disminuye, lo que determina hiperuricemia y síntomas de gota (Poma, 2016).
- **Efectos cardiovasculares:** Según la Agencia de protección de la Salud, existen estudios epidemiológicos que manifiestan una débil asociación entre el plomo y la presión sanguínea; es la elevación sanguínea mayor en adultos que en jóvenes (Rodríguez Rey et al., 2016).
- **Efectos reproductivos:** Exposición crónica del plomo causa efectos adversos en el sistema reproductivo femenino y masculino. La exposición ocupacional del plomo en mujeres antes o durante el embarazo está asociada con abortos espontáneos, muerte fetal, nacimientos prematuros, y recién nacidos de bajo peso (Rodríguez Rey et al., 2016).
- **Efectos hematológicos:** Puede conllevar a cuadros de anemia, ya sea del tipo hipocrómico como del tipo microcítico (Burgel & Pose Román, 2010).
- **Efectos gastrointestinales:** Puede desencadenar en cuadros de anorexia, eventos de estreñimiento, cólicos intensos que en algunos casos pueden estar acompañados de vómitos y sudoración intensa (Burgel & Pose Román, 2010).
- **Otros**

2.2.2. Cadmio

El cadmio pertenece al grupo de elementos naturales de la corteza terrestre dentro de sus características básicas encontramos que presenta carácter metálico, coloración blanco azulada, con punto de fusión de 320.9°C, punto de ebullición de 765°C y una densidad de 8.65 g/ml. Además, es considerado como un metal pesado, por lo cual, al igual que otros no se degrada en el ambiente, tiende a bioacumularse; por otro lado, el cadmio a través de aire puede desplazarse grandes distancias antes de depositarse ya sea en el agua o en el suelo. Sin embargo, no se debe dejar del lado que el cadmio tiene una alta capacidad de adherirse fuertemente al suelo, así como de ingresar al cuerpo humano, animales, plantas (Health Canada, 2008).

Al igual que otros metales el cadmio, es requerido a nivel industrial para la elaboración de baterías cadmio-níquel, pigmento en pinturas, plástico, textiles, aleaciones con cobre, aluminio y plata, en la industria de la fotografía, en la elaboración de foto conductores, células solares fotoeléctricas, así como en la industria medicinal actuando como astringente (A. Ramírez, 2013). Por lo cual, el cadmio requerido es obtenido de la industria minera, pero no como producto principal, sino como producto secundario, por lo general se encuentra asociado en su mayoría a minerales de zinc y en menores cantidades a minerales de cobre y de plomo.

De manera muy similar a lo mencionado en el caso del plomo, la contaminación no solamente se produce a personas que se encuentran en contacto directo con la explotación, producción o manipulación de algún mineral, compuesto o químico que presente contenido de cadmio, sino que la población en general está expuesta a este metal pesado. Las fuentes principales de exposición ocurren a partir de suelo, agua y aire, así como por medio de alimentos y tabaco contaminados por dicho metal; se debe tener en cuenta que, tanto la deposición atmosférica de cadmio, las actividades mineras y la aplicación de fertilizantes y enmiendas en los campos pueden desencadenar en la contaminación de suelos y en la absorción de cadmio por los cultivos para el consumo humano (Sanchez Barrón, 2016). Las vías de adsorción del cadmio son:

- Respiratoria: Por medio de inhalación de polvo o material particulado que pudiese contener cadmio en distintas proporciones.
- Digestiva: Por medio de la ingesta de alimentos o bebidas que pueden contener partículas de cadmio, por previa contaminación.
- Dérmica: Por entrar del contacto entre compuestos orgánicos de cadmio y la piel

Dentro de las consecuencias que el cadmio puede causar en la salud humana se encontraron las siguientes:

- Es conocido que la ingesta de alimentos que poseen altos niveles de cadmio puede ocasionar una grave irritación al estómago desencadenando en problemas relacionados a vómitos, diarrea y en casos muy graves en muerte (Ramelli et al., 2009).
- Dentro de uno de los efectos negativos en la salud humana se encuentra, el daño de los túbulos (daño que en muchas oportunidades resulta ser irreversible) lo cual repercute en el fallo en la función renal. Además, si se analiza la afección en el metabolismo, se encuentra que se ocasiona alteraciones en el metabolismo de calcio, así como en la resorción ósea, lo que favorece situaciones de formación de cálculos renales, osteomalacia u osteoporosis, dolor en las articulaciones y fracturas óseas. Por otro lado, si alguien se encuentra expuesto a grandes cantidades que en su composición posea óxido de cadmio, podrían sufrir de neumonitis aguda, cambios estructurales pulmonares, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) Y edemas pulmonares (Sanchez Barrón, 2016).
- Tanto la Agencia para la Investigación del Cáncer (IARC) como la Departamento de Salud y Servicios Humanos de E.E.U.U (DHHS) han determinado que tanto el cadmio como los compuestos de cadmio (sulfuro de cadmio, cloruro de cadmio, sulfoseleniuro de cadmio, óxidos de cadmio, entre otros) son catalogados como cancerígenos para el ser humano (Health Canada, 2008)
- Si se produce inhalación de este metal pesado, lo que se podría ocasionar es hepatitis, anuria, anemia; además, si la piel se encuentra expuesta a sustancias o compuestos de cadmio se podría presentar cuadros de irritación en la piel u ojos, así como desarrollar una fiebre por humus metálicos. Por otro lado, se podría desarrollar una fiebre por humus metálicos, la cual genera síntomas como: dolor de cabeza, fiebre, escalofríos, dolores, opresión en el pecho y tos (García et al., 2012).

2.3. Contaminación del Suelo

Mencionar el termino contaminación del suelo, es hablar de la presencia en dicho medio de una sustancia, un químico o compuesto fuera de sitio el cual se encuentra en una concentración más elevada de lo usual que va a desencadenar efectos adversos, negativos en organismos para los cuales no se encuentra destinado (Rodríguez Eugenio, Natalia; McLaughlin & Pennock, 2019)

2.3.1. Origen de contaminación del suelo

La contaminación del suelo puede desencadenarse a partir de dos tipos de procesos:

- **Contaminación de origen puntual:**

El termino puntual, refiere a que la contaminación del medio suelo se ha producido a partir de eventos específicos ya se por medio de actividades que se planearon como actividades que no. Dentro de este grupo de actividades encontramos a las antropogénicas, en las que pueden ingresar actividades industriales, actividades mineras (procesamiento, fundición), descarga de efluentes, derrame de presas de relave mala gestión de la eliminación de residuos sólidos y aguas residuales, alto uso de agroquímicos, entre otros (Conde, 2015).

- **Contaminación de origen difuso:**

El termino difuso, refiere a que la contaminación del medio suelo se ha producido a partir de fuentes variables y en algunos casos no es posible identificar y que además dicha contaminación se ha propagado por áreas muy extensas acumulándose en dicho medio; en adición, la contaminación de origen difuso se presenta donde la emisión, transformación y dilución de contaminantes en otros medios ha ocurrido previamente a su transferencia al suelo (Rodríguez Eugenio, Natalia; McLaughlin & Pennock, 2019). No se debe dejar de lado que este tipo de contaminación involucra transporte y los medios para que dicho transporte sea factible son el agua, aire y el mismo suelo. Ejemplos claros o relacionados con la contaminación difusa, suelen ser: deposición atmosférica, contaminantes acidificantes, amoníaco y depósitos de nitrógeno, sistemas de producción agraria inadecuados, plaguicidas, reciclaje inadecuados de los lodos de depuración de aguas residuales, entre otros (Conde, 2015).

2.3.2. Fuentes de contaminación del suelo

Dentro de las fuentes de contaminación del suelo, se reconocen dos:

● Fuentes naturales:

Contaminación del suelo producto de eventos naturales (geológicos, geotécnicos, ambientales). Se tienen los siguientes ejemplos:

- ❖ Los procesos ígneos dieron origen a los diferentes yacimientos minerales, dentro de los cuales encontramos algunos metales catalogados como pesados (plomo, cadmio, arsénico, antimonio, estaño, cobre, otros), lo cuales si se encuentra en altas concentraciones resultan como contaminantes naturales del suelo.
- ❖ Otro contaminante natural es el arsénico (dependiendo de la concentración a la que se encuentre), se puede producir a partir de erupciones volcánicas, también se pueden evidenciar por procesos de erosión en yacimientos con alto contenido de este metal (yacimientos de arsenopirita)
- ❖ Radón (Rn), es un gas radioactivo que se puede encontrar de manera natural tanto en los suelos como en las rocas, dicho gas emana de capas más profundas de la tierra; es controlado su ascenso por variables como porosidad y estructuras del suelo (Hafez & Awad, 2016).

● Fuentes antropogénicas:

Ligado a contaminación producto o resultado de actividades humanas, es decir, ciertas actividades que en sus procesos, emisiones o productos liberan contaminantes o sustancias tóxicas que pueden afectar directamente al medio suelo. Dentro de las fuentes antropogénicas, se encuentran:

- ❖ **Actividades de Transporte**
- ❖ **Actividades Mineras**
- ❖ **Actividades Industriales**
- ❖ **Actividades de Infraestructura**
- ❖ **Desechos Residuales**
- ❖ **Aguas Residuales**
- ❖ **Actividades Agrícolas**
- ❖ **Actividades Ganaderas**
- ❖ **Actividades militares**

2.3.3. Principales contaminantes del suelo

Dentro de los contaminantes conocidos para el suelo, se tienen los siguientes:

- **Metales pesados**
- **Nitrógeno**
- **Fósforo**
- **Plaguicidas**
- **Hidrocarburos aromáticos policíclicos**
- **Contaminantes orgánicos persistentes**
- **Radionúclidos**
- **Microorganismos patógenos**
- **Otros**

2.3.4. Adsorción de contaminantes en el suelo

El proceso de adsorción refiere a la interacción de moléculas de un fluido con un sólido, resultando que dichas moléculas serán retenidas por un cierto tiempo en dicho sólido (Rodríguez Eugenio, Natalia; McLaughlin & Pennock, 2019). Los tipos de adsorción que se pueden presentar son los siguientes:

- **Adsorción Física:** si el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan sólo por medio de fuerzas de Van der Waals. Las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos, apenas unos cuantos kJ, comparables al calor de vaporización del adsorbato. El aumento de la temperatura disminuye considerablemente la adsorción (Fernández Pino, 2011).
- **Adsorción Química:** Denominada también quimisorción, se produce cuando las moléculas adsorbidas reaccionan químicamente con la superficie, en este caso se forman y se rompen enlaces. La adsorción química no va más allá de una monocapa en la superficie (Fernández Pino, 2011).

2.3.5. Movilización de los contaminantes en el suelo

La movilización de los contaminantes en el suelo se puede dar de muchas maneras, pero siempre a partir de una actividad conjunta del suelo, aire o agua. Ejemplo de estos tipos de movilización son los siguientes:

- Las emisiones de materiales particulados, o contaminantes a la atmosfera, por corrientes de aire pueden ser movilizados o transportados rangos entre pequeñas a grandes distancias, lo cuales posteriormente terminan depositándose en los suelos.
- Aguas subterráneas que pueden traer consigo contenido de metales pesados, los cuales posteriormente pueden ser depositados en otras áreas, o también pueden seguir con el cauce de agua y terminar en aguas superficiales las cuales pueden ser utilizadas tanto para consumo humano, animal, o para el cultivo de plantas.
- Procesos en los cuales algunos químicos se pueden disolver mediante el agua y por este mismo medio ser transportados a los suelos aledaños, generando la contaminación de los mismos.
- Por procesos de escorrentía se pueden llevar contaminantes de un punto a otro en el mismo medio suelo.

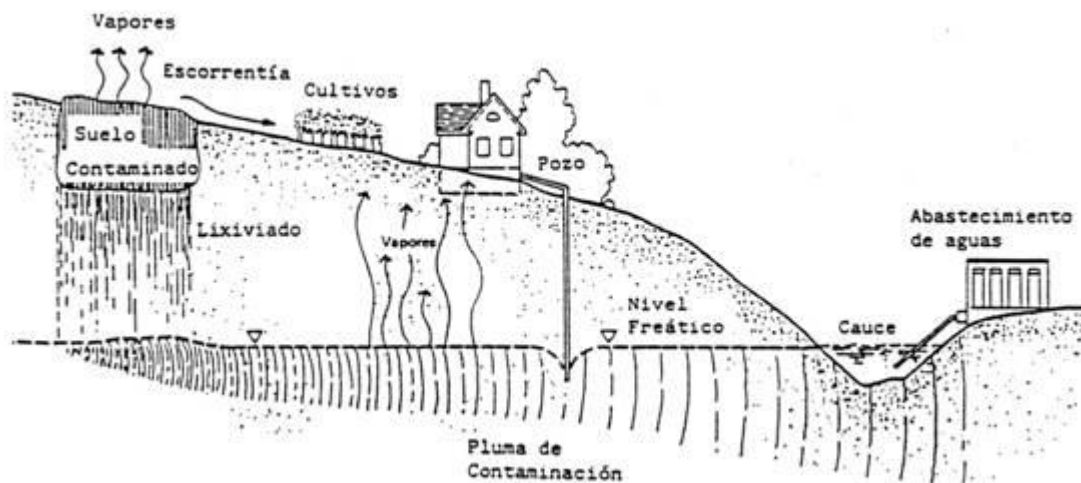


Ilustración 1: Rutas de movilización de los contaminantes presentes en un suelo contaminado

Fuente: (Gestión-Calidad, 2016)

2.4. Legislación Ambiental

Basado en el principio del desarrollo sostenible, se establecen leyes y normas que regulan las actividades para que todos ejerzamos el derecho a un ambiente con las condiciones mínimas para el pleno desarrollo de la vida.

La industria minera, es una actividad extractiva, por lo que la regulación asociada a ella es muy compleja, siendo justamente el sector más regulado en el Perú. La minería tiene normativa que se rige para tanto sus actividades de preparación, durante la operación y también posterior a la operación, donde involucramos los procesos de cierre minero y monitoreo ambiental.

Más aún muchas de las operaciones mineras pasadas, no siguieron los lineamientos que actualmente se tiene en la normativa peruana, como resultado a lo largo de todo el país se tiene una gran cantidad de pasivos mineros, y entre estos pasivos mineros, algunos son relaveras abandonadas, el caso de la quebrada Corte Ladrones es uno de ellos.

Las relaveras deberían cerrarse y seguir procedimientos de monitoreo posterior a su cierre, algunas de esta lista de normativas se tienen en las siguientes líneas. Es importante indicar que las afectaciones de una relavera pueden ser al suelo, agua y aire, pero su normativa asociada directamente es con las condiciones de calidad de suelo, más aún ya que la presente investigación se realiza en una zona donde hay personas asentándose para vivir.

LEY N° 28611.- LEY GENERAL DEL AMBIENTE (Ley General del ambiente, Perú, 2013)

“Artículo 31°. - Del Estándar de Calidad Ambiental.

(...) 31.1 El Estándar de Calidad Ambiental - ECA es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos. (...).”

“Artículo 91°. - Del recurso suelo

El Estado es responsable de promover y regular el uso sostenible del recurso suelo, buscando prevenir o reducir su pérdida y deterioro por erosión o contaminación. Cualquier actividad económica o de servicios debe evitar el uso de suelos con aptitud agrícola, según lo establezcan las normas correspondientes.”

2.4.1. Legislación sobre suelos

La regulación para las condiciones adecuadas para el suelo se mide por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Cabe recalcar en este punto que no existen Límites Máximos Permitidos (LMP) para el suelo, esto se debe a que la aplicación de los LMP se da solo para efluentes o emisiones. Lo anterior mencionado no quita una relación entre el suelo y los demás componentes ambientales, ya que la existencia de una relavera por ejemplo podría ser causante de Drenaje Ácido de Mina (DAM) por un caudal hídrico que pase cerca.

Estándares de Calidad Ambiental para suelo

Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM (Ministerio del Ambiente, Perú, 2013)

“Artículo 3.- De la superación de los ECA para Suelo. -De superarse los ECA para Suelo, en aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios, las personas naturales y jurídicas a cargo de estas deben realizar acciones de evaluación y, de ser el caso, ejecutar acciones de remediación de sitios contaminados, con la finalidad de proteger la salud de las personas y el ambiente. Lo indicado en el párrafo anterior no aplica cuando la superación de los ECA para Suelo sea inferior a los niveles de fondo, los cuales proporcionan información acerca de las concentraciones de origen natural de las sustancias químicas presentes en el suelo, que pueden incluir el aporte de fuentes antrópicas no relacionadas al sitio en evaluación.”

Tabla 2: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

Parámetros en mg/kg PS ⁽²⁾	Usos del Suelo ⁽¹⁾			Métodos de ensayo ^{(7) y (8)}
	Suelo Agrícola ⁽³⁾	Suelo Residencial/ Parques ⁽⁴⁾	Suelo Comercial ⁽⁵⁾ / Industrial/ Extractivo ⁽⁶⁾	
ORGÁNICOS				
Hidrocarburos aromáticos volátiles				
Benceno	0,03	0,03	0,03	EPA 8260 ⁽⁹⁾ EPA 8021
Tolueno	0,37	0,37	0,37	EPA 8260 EPA 8021
Etilbenceno	0,082	0,082	0,082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos ⁽¹⁰⁾	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
Hidrocarburos poliaromáticos				
Naftaleno	0,1	0,6	22	EPA 8260 EPA 8021 EPA 8270
Benzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270
Hidrocarburos de Petróleo				
Fracción de hidrocarburos F1 ⁽¹¹⁾ (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 ⁽¹²⁾ (>C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 ⁽¹³⁾ (>C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
Compuestos Organoclorados				
Bifenilos policlorados - PCB ⁽¹⁴⁾	0,5	1,3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	0,1	0,2	0,5	EPA 8260
Tricloroetileno	0,01	0,01	0,01	EPA 8260
INORGÁNICOS				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total ⁽¹⁵⁾	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060/ EPA 7199 ó DIN EN 15192 ⁽¹⁶⁾
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 ó 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 SEMWW-AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/o ISO 17690:2015

Fuente: (Ministerio del Ambiente, Perú, 2013)

EPA: Environment Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

DIN: German Institute for Standardization

MS: materia seca a 105°C, excepto para compuestos orgánicos y mercurio no debe exceder 40°C por 4 días. Luego de cada la muestra debe ser tamizada con malla de 2 mm. Para el análisis se emplea muestra tamizada <2mm.

Nota 1: Plaguicidas regulados debido a su persistencia en el ambiente, en la actualidad está prohibido su uso, son Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)

Nota 2: Concentración de metales pesados.

Tomado de: Resolución Ministerial N° 307-2012-MINAM

2.4.2. Legislación sobre pasivos ambientales

Ley N° 28090 - LEY QUE REGULA EL CIERRE DE MINAS (Ley que regula el Cierre de Minas, Perú, 2009)

“Artículo 3º. - Definición del Plan de Cierre de Minas El Plan de Cierre de Minas es un instrumento de gestión ambiental conformado por acciones técnicas y legales, efectuadas por los titulares mineros, destinado a establecer medidas que se deben adoptar a fin de rehabilitar el área utilizada o perturbada por la actividad minera para que ésta alcance características de ecosistema compatible con un ambiente saludable y adecuado para el desarrollo de la vida y la preservación paisajista. La rehabilitación se llevará a cabo mediante la ejecución de medidas que sean necesarias realizar antes, durante y después del cierre de operaciones, cumpliendo con las normas técnicas establecidas, las mismas que permitirán eliminar, mitigar y controlar los efectos adversos al ambiente generados o que se pudieran generar por los residuos sólidos, líquidos o gaseosos producto de la actividad minera.”

REGLAMENTO PARA EL CIERRE DE MINAS (Reglamento Para El Cierre De Minas, Perú, 2005)

“Artículo 10º. - (...) Debe ser ejecutado en forma progresiva durante la vida útil de la operación minera, al término de la cual se debe cerrar el resto de áreas, labores e instalaciones que por razones operativas no hubieran podido cerrarse durante la etapa productiva o comercial, de forma tal que se garantice el cumplimiento efectivo de los siguientes objetivos:

- a) Estabilidad física a largo plazo.*
- b) Estabilidad química a largo plazo.*
- c) Rehabilitación de las áreas afectadas.*
- d) Uso alternativo de áreas o instalaciones, de conformidad con lo establecido en el artículo 18.*
- e) Determinación de las condiciones del posible uso futuro de dichas áreas o instalaciones.”*

2.4.3 Legislación sobre relaves

En Perú no se cuenta con normativa específica para los depósitos de relaves, razón por la cual se presentó información obtenida del régimen normativo de Chile.

DECRETO SUPREMO Nº 248 REGLAMENTO PARA LA APROBACIÓN DE PROYECTOS DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CIERRE DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES (Ministerio de Minería, Chile, 2007)

“Artículo 39°. - Cuando el Usuario deba suspender las operaciones del depósito de relaves, ya sea en forma temporal o definitiva, deberá adoptar las medidas necesarias para evitar el riesgo de accidente, comunicándolas previamente al Servicio para su aprobación. El Servicio deberá pronunciarse en un plazo máximo de quince (15) días hábiles.”

“Artículo 46°. - El Proyecto de Cierre contendrá un plan de acondicionamiento del depósito para soportar condiciones en el largo plazo, considerando medidas de refuerzo y rehabilitación, tal que proteja la salud y seguridad de las personas, y restituya el terreno en condiciones aceptables, conforme a lo prometido y aceptado en su Plan de Cierre.”

El Manejo de Relaves Mineros es complejo, por ello el Banco Mundial en asociación al Programa de Asistencia Técnica al Ministerio de Energía y Minas presentan una Guía para el Manejo de Relaves Mineros. Las guías que se presentan por las instituciones no son de carácter obligatorio, pero su cumplimiento puede tener resultados positivos entorno a la aprobación normativa.

Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros (Ministerio de Energía y Minas-Perú, 2005)

(...) “En general, el tiempo de cierre puede tomar de 2 a 30 años, aunque es típico el lapso de 5 a 10 años y depende de la complejidad y requerimientos técnicos de las medidas de cierre y el monitoreo pertinente. Las medidas de cierre deberán ser tales que su implementación sea también factible en la eventualidad del cese prematuro de las operaciones, debiendo incluirse también, en el planeamiento de cierre, las condiciones de contingencia para la suspensión temporal de las operaciones. (...)

(...) Post-cierre.

El post-cierre o abandono comienza a continuación de la exitosa terminación de las medidas de cierre y se extiende tanto como se requiera para que la estabilidad física y química del depósito de relaves quede asegurada.” (...)

2.5 Recuperación sobre suelos contaminados

Según el equipo de la Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en tecnologías Medioambientales y Energía (CITME) (Ortiz et al., 2007), tenemos las siguientes metodologías para la recuperación de suelos contaminados.

2.5.1 Técnicas de contención

Las técnicas de contención se emplean para prevenir o reducir el movimiento de los contaminantes. Son de bajo costo y requieren monitoreo continuo, entre las principales tenemos las siguientes:

- Barreras verticales
- Barreras horizontales
- Barreras de suelo seco
- Sellado superficial
- Sellado profundo
- Barreras hidráulicas

2.5.2 Técnicas de confinamiento

Las técnicas de confinamiento, también llamadas de estabilización/solidificación, promueven la reducción de contaminantes con el control de su movilidad a través de métodos de encapsulamiento o procesos físico químicos estabilizadores. Lo ideal es conseguir una estructura sólida de gran integridad. Entre los principales procesos tenemos:

- Estabilización físico-química
- Inyección de solidificantes
- Vitrificación

2.5.3 Técnicas de descontaminación

Tratamientos físico-químico. - son aquellos que constituyen un conjunto de procesos que implican metodologías estrictamente que utilizan los principios físico-químicos para la descontaminación de un medio, entre los principales tenemos: extracción, lavado, flushing, electrocinética, adición de enmiendas, barreras permeables activas, inyección de aire comprimido, pozos de recirculación y oxidación ultravioleta.

Tratamientos biológicos. - son aquellos tratamientos que incluyen en su proceso el uso de materiales orgánicos como plantas o microorganismos para la descontaminación de un medio. Estos procesos pueden ser de dos tipos:

- **Procesos In situ:** Son aquellos procesos que para su aplicación se requiere realizar el proceso en el mismo lugar del problema a solucionar. Tenemos entre los principales: biodegradación asistida, biotransformación de metales, fitorremediación y bioventing.
- **Procesos Ex situ:** Debido a las condiciones del lugar o del tratamiento se requiere que estos procesos sean realizados en un lugar específico, por lo que el material debe ser trasladado al lugar de tratamiento. Entre los principales tenemos: landfarming, biopilas, compostaje y lodos biológicos.

Tratamientos térmicos. - Son aquellos que utilizarán el fundamento de la temperatura y las características propias de los compuestos para su tratamiento, en muchos de estos casos, la diferencia de temperatura de fusión es clave para el proceso adecuado. Entre los principales tenemos: incineración y desorción térmica.

Tratamientos mixtos. – Aquellos que pueden tener procesos que involucren varios tratamientos anteriormente mencionados juntos, ya sea en paralelo o en serie. Entre los principales tenemos: extracción multifase y atenuación natural.

2.6. Fitorremediación

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas, globalmente reciben el nombre de fitorremediación (en español se usan indistintamente también: fitorrecuperación, fitocorrección, fitorrestauración o fitorrehabilitación). Se define como el uso de plantas verdes para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad (Salt et al., 1998).

Conocida también como una tecnología innovadora para el proceso de recuperación de relaves mineros, la fitorremediación tiene en gran mayoría estudios en laboratorio. Dependiendo de las condiciones ambientales y situacionales, la eficiencia fitorremediadora tiene una gran variación. Además, el uso de plantas no solo tiene los fines fitorremediadores, sino que involucran procesos de adecuación de las zonas de sembrío, como su aplicación para cercos de entrada y estabilización físico-química.

2.6.1. Técnicas de fitorremediación

La tecnología de fitorremediación se basa en procesos fisiológicos básicos de las plantas y los microorganismos presentes en ellas, como la transpiración, nutrición y fotosíntesis. Las técnicas de biorremediación se presentan como mecanismos específicos asociados cada uno de estos procesos, y dependerán de las condiciones insitu y los resultados requeridos para su adecuada aplicación.

Entre las técnicas de fitorremediación tenemos dos tipos:

Técnicas de Contención. – Técnicas que involucran generar una estabilidad físico-química de medio ya será suelo o agua. Entre las medidas de contención tenemos: rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización

Técnicas de Eliminación. – Técnicas que no tienen como fin específico la estabilidad físico-química, sino la eliminación o remplazamiento de concentración de metales que por su presencia generan una deplorable condición para la vida. Entre las medidas de eliminación tenemos: fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización.

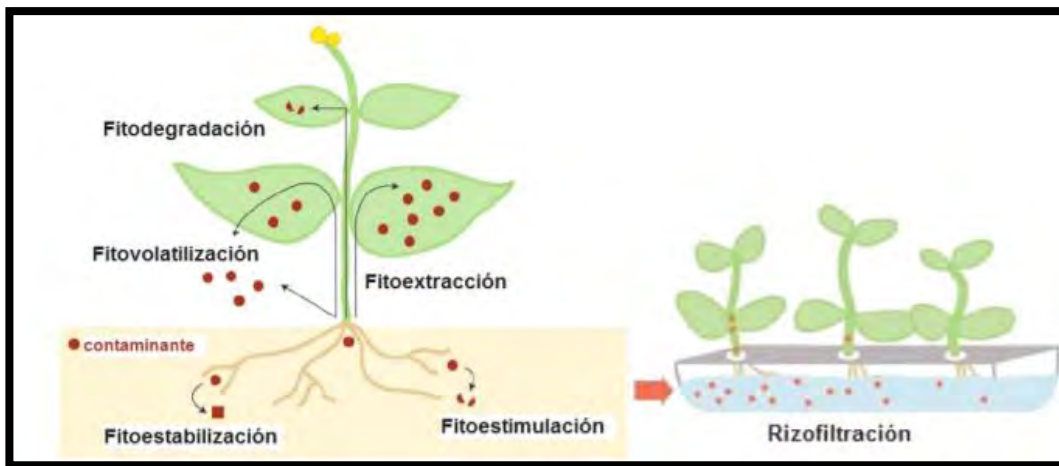


Ilustración 2: Sobre la representación de las técnicas o mecanismos de fitorremediación

Fuente: (Pilon-Smits, 2005)

- **La rizofiltración.** - Esta técnica utiliza las plantas para eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz (Dushenkov et al., 1995). El procedimiento consiste en aplicar la agricultura hidropónica esperando que la raíces tengan la suficiente consistencia y desarrollo para ser colocadas en el medio a remediar. La saturación de la concentración de metales en las raíces será el indicador de cosecha y renovación cíclica de plantas hasta conseguir la estabilidad del medio.
- **La fitoestabilización.** - Permite inmovilizar contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces o bien, por precipitación en la zona de la rizosfera. Este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire (Barton et al., 2005). La fitoestabilización es efectiva en suelos de textura fina con alto contenido de materia orgánica (Padmavathiamma & Li, 2007). Su aplicación tiene fines de manejo de extensiones extensas.
- **La fitoinmovilización.** - provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación (Carpena & Bernal, 2007).
- **La fitodegradación.** - Las plantas y los microorganismos asociados a ellas degradan los contaminantes orgánicos en productos inofensivos, o bien, mineralizarlos hasta CO₂ y H₂O. En este proceso los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas como la de halógenas y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación (Singh & Jain, 2003). Sus primeros usos de desarrollaron como base para el tratamiento de suelos contaminados por pesticidas, TNT y combustibles fósiles.

- **La fitoextracción.** - También conocido como Fito acumulación, consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas. El primer paso para la aplicación de esta técnica es la selección de las especies de planta más adecuada para los metales presentes y las características del emplazamiento (Delgadillo-López et al., 2011).
- **La fitovolatilización.** - Se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos. Algunos de estos pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera (Prasad & De Oliveira Freitas, 2003).

2.6.2 Fitoextracción, especies vegetales estudiadas

“Algunas plantas empleadas para esta técnica fitocorrectiva son: *Thlaspi caerulescens* (Cd); *Sedum alfredii*, *Viola baoshanensis* y *Vertiveria zizanioides* (Zn, Cd, Pb); *Alyssum murale*, *Trifolium nigriscens*, *Psychotria douarrei*, *Geissois pruinosa*, *Homalium guillainii*, *Hybanthus floribundus*, *Sebertia acuminata*, *Stackhousia tryonii*, *Pimelea leptospermoides*, *Aeollanthus biformifolius* y *Haumaniastrum robertii* (Ni); *Brassica juncea*, *Helianthus annuus*, *Sesbania drummondii* (Pb); *Brassica napus* (Cu, Pb, Zn); *Pistia stratiotes*; (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn); *Acacia visco*, *Buddleja coriacea*, *Eucalyptus globulus*, *Myoporum laetum*, *Polylepis racemosa*, *Schinus molle* (Sb, As, Cd, Cu, Pb) y *Calamagrostis*, *Steud*, *Hypochoeris meyeniana*, *Paranephelius uniflorus* Poepp, y *Astragalus garbancillo* (As, Cd, Zn, Pb)”. (Citado en "Delgadillo-López et al., 2011")

3. ASPECTOS GENERALES

3.1 Historia

Para entender cómo se llegó a formar el relave acumulado en la quebrada Corte Ladrones, se debe asociar su historia con el Anexo de Corona. Corona es un pueblo situado entre el kilómetro 47 y 49 de la Carretera Central del Perú, con una altitud aproximada de 1300 msnm, es un anexo que pertenece al Distrito de Santa Cruz de Cocachacra. Corona tiene una historia muy compleja, para este punto se recopiló información de los pobladores del mismo lugar. El señor David Astuyauri declaró que Corona La población se asentó en Corona debido al comercio que fue activado por la presencia de la garita de control, pobladores indican la existencia desde mediados de los años 50. Pero la población de Corona se vio en aumento debido al descubrimiento de un yacimiento de baritina, explotados por Barmine S.A. (Astuyauri Arroyo, 2020).

En el año 1984 el Fenómeno del Niño tuvo repercusiones desastrosas en Corona, una de estas repercusiones fue el desborde del río que inundó todo el pueblo. Debido a lo sucedido se construyó un muro de protección para que el río no pase, el material usado fue desmonte y ganga de las operaciones de Barmine.

Posterior a su cierre de actividades, las operaciones se separaron entre Perubar y Cecibar, quienes tomaron el control del yacimiento cerca de los años 80's con su posterior apertura de tres unidades mineras; mina Juanita (Método subterráneo) y mina Graciela (mixto superficial subterráneo) con Perubar, y mina Cecilia (Método subterráneo) con Cecibar. La planta de procesamiento de la mina Cecilia se encontraba en la quebrada Corte Ladrones, las zonas de acumulación de relaves y desmontes también, en parte, se encoraban ahí.

Con la culminación de actividades y el cese de operaciones, los relaves mineros y desmonte fueron abandonados, por lo que actualmente tienen un proceso de inestabilidad físico-química. El Instituto minero, geológico y metalúrgico del Perú concluyó que la esencia de los relaves de la minera, actualmente tienen como resultado una variación del cauce de la quebrada Corte Ladrones, que puede tener como resultados flujo de detritos o huaycos. Además, la coloración blanca de los suelos evidencia su afectación por los procesos extractivos de sulfuros, que en contactos con compuestos como el agua desarrollan DAM y el desarrollo de compuesto dañinos.

A pesar de las malas condiciones del terreo, las comunidades pertenecientes a Santa Cruz de Cocachacra y San Bartolomé tienen un litigio por la propiedad de los terrenos, y ante ello, el año 2019 la comunidad de Santa Cruz de Cocachacra, que en parte tiene integrantes del

pueblo de Corcona, se asentó en la quebrada Corte Ladrones en la modalidad de invasión, con el fin de asegurar su competencia en el litigio de los terrenos.

3.2 Ubicación Geográfica

La quebrada Corte Ladrones se encuentra ubicada en el distrito de Santa Cruz de Cocachacra, provincia de Huarochirí, departamento de Lima, contigua a esta se ubica el río Rímac; para poder llegar a esta ubicación se accede por la carretera central hasta aproximadamente el kilómetro 47-49 de la misma. Cuenta con las siguientes coordenadas UTM.

Tabla 3: Coordenadas y elevación de zona de estudio, Quebrada Corte Ladrones

Norte	Este	Elevación
8682572	329021	1327
WGS 84 - Zona 18S		



Ilustración 3: Ubicación de la Quebrada Corte Ladrones

Fuente: (de la Cruz Matos & Sosa Senticala, INGEMMET, 2016)

3.3 Tipo de Geología

La Quebrada Corte Ladrones se encuentra bordeada por dos formaciones, una de ellas el Batolito de la Costa (Margen izquierdo) y la Formación Arahuay.

El Batolito de la Costa evidencia la existencia y conformación de rocas ígneas compuestas por dioritas de grano medio con bastante plagioclasa y poco cuarzo. Presenta alteración en varias zonas, en comparación con la formación Arahuay menor fracturamiento. Mejor calidad de roca (resistencia). Las rocas ígneas presentan cristales minerales grandes y visibles debido a un enfriamiento progresivo, suelen tener su origen dentro de la corteza terrestre.

La Formación Arahuay evidencia la existencia y conformación de rocas volcánicas compuestas por lavas andesíticas con calizas grises. Presenta un alto fracturamiento. Baja calidad de roca (resistencia). Las rocas volcánicas presentan cristales minerales no visibles debido al rápido enfriamiento del magma, su origen se da sobre la corteza terrestre.



Ilustración 4: Formaciones que conforman la Quebrada Corte Ladrones

Formaciones que conforman la Quebrada Corte Ladrones

(de la Cruz Matos & Sosa Senticala, 2016)

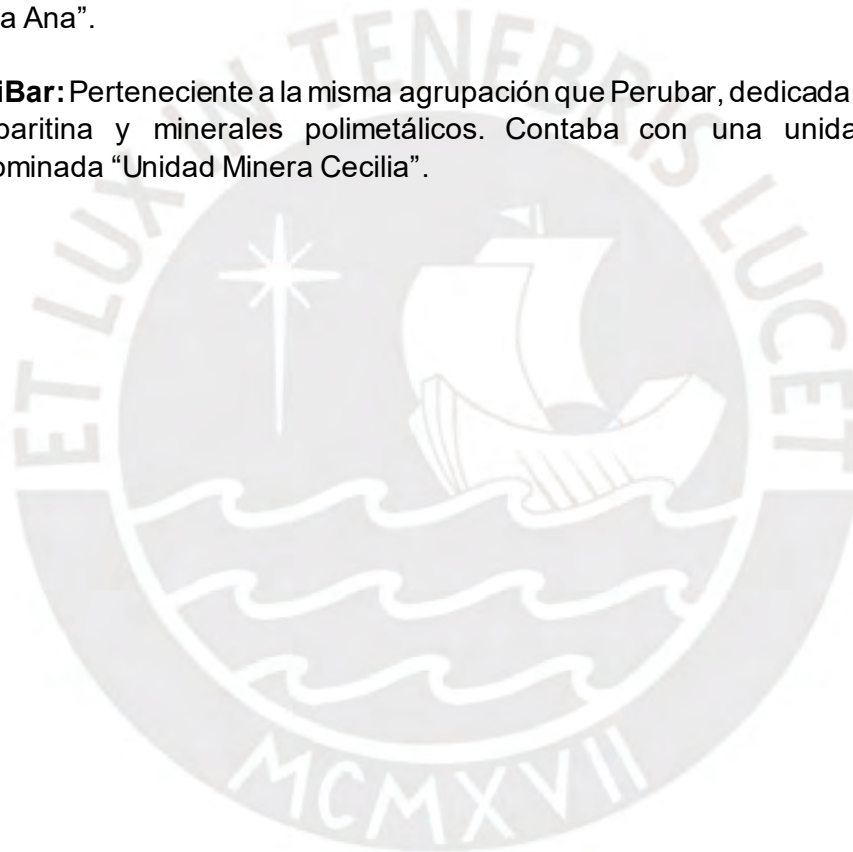
3.4 Clima y Precipitación

La zona de la Quebrada Corte Ladrones está catalogada por presentar un clima semicálido, para el cual la temperatura varía entre un rango de los 15°C (correspondiente a los meses de julio a agosto) hasta los 28°C (correspondiente a los meses de enero a marzo). Para el caso de las precipitaciones presenta un promedio anual de 110mm (los meses en los que se suele presentar lluvia corresponden de diciembre a marzo)

3.5 Operaciones Mineras

Dentro de la zona años atrás se encontraba en operación dos unidades mineras:

- **PeruBar:** Tuvo el inicio de sus operaciones en agosto del año 1959. Dedicada a la extracción de baritina y minerales polimetálicos. Contaba con un tajo denominado “Unidad Minera Graciela” y una unidad subterránea denominada “Unidad Minera Santa Ana”.
- **CeciBar:** Pertenece a la misma agrupación que Perubar, dedicada a la extracción de baritina y minerales polimetálicos. Contaba con una unidad subterránea denominada “Unidad Minera Cecilia”.



4. PARTE EXPERIMENTAL

El experimento se realizó en medio de la crisis por la pandemia del Covid-19, razón por la cual no se cuenta con laboratorios especializados para todas las pruebas, muchas de estas tienen cálculos con metodologías antiguas, métodos aplicativos de campo, todos detallados en el presente informe.

La presente investigación desarrolla un estudio de fitorremediación, pero más que ello es un estudio de análisis de condiciones óptimas de aplicación de la fitorremediación. Para conseguir tal fin el proyecto tiene varios pasos, divididos en dos principales: el experimento de selección, que nos ayudará a identificar las plantas con la mejor respuesta inicial para superar las condiciones adversas del relave y el experimento de fitorremediación donde identificamos las condiciones específicas para que una planta seleccionada pueda cumplir su tarea, fitorremediar en este caso, además en este segundo punto se obtendrá el parámetro más importante que es el porcentaje fitorremediado por metal pesado.

4.1 EXPERIMENTO DE SELECCIÓN

4.1.1 Metodología

4.1.1.1 Metodología General

El experimento de selección sigue la metodología:

- a. Delimitación de grupo de plantas a analizar, este punto es importante ya que no es factible analizar todas las especies de flora en la presente tesis.
- b. Preparación de recipientes.
- c. Preparación de sustratos, análisis inicial exterior básico, identificación de variables influyentes como densidad para el cálculo de pesos para la distribución correspondiente.
- d. Preparación de sustratos previamente analizando características como comportamiento exterior visible, calculando pesos necesarios requeridos y distribuciones necesarias.
- e. Sembrado en todos los recipientes con uso de la metodología de sembrío. Riego y toma de datos de ambiente y condiciones comunes.
- f. Registro y evaluación de datos a los dos meses de iniciado el proyecto.

4.1.1.2 Metodología de Sembrío

- a. Primero se seleccionan las semillas, para este punto se usa zaranda para no mezclar las semillas de las flores con semillas de otras plantas, lo ideal es que en cada recipiente tengamos solo la planta a estudiar. Además, se utiliza un método antiguo que se basa en la densidad de las semillas, se utiliza un vaso de agua y se echan las semillas, las que se mantengan a flote sin inmutarse indican que no tienen suficiente masa y esto se puede deber a dos razones, o están secas o el cascarón está vacío lo que genera muy baja densidad por el poco desarrollo de la semilla.
- b. Se procede a llenar los recipientes(vasos) con el material al 75% de su capacidad, y se remoja el sustrato durante un día.
- c. Se realiza el sembrado de las semillas a 0.5 cm de la superficie y se mantiene un riego constante durante todo el proceso del experimento. No superar la cantidad de 10 semillas por recipiente y mantener un riego de 45 cm³.
- d. Es importante que la ubicación de sembrado se realice en las mismas condiciones de la zona de estudio, si se puede establecer un laboratorio de prueba cercano es lo mejor. Esto con el fin de mantener las condiciones climatológicas, presión y otros relacionados a la altitud y ubicación geográfica.

4.1.2 Diseño y construcción de recipientes para selección

4.1.2.1. Construcción de recipiente

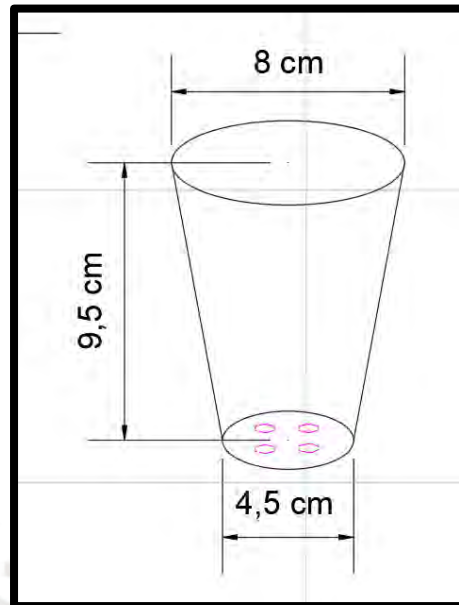


Ilustración 5: Medidas de los vasos a utilizar como recipientes de las muestras

- Se utilizan vasos con una altura de 9.5 cm, radio mayor de 8 cm y radio menor de 4.5 cm, un total de volumen que pasado a peso de H₂O obtiene un similar de 9.3 onzas.
- En el fondo de los vasos se realizan 4 orificios del mismo tamaño con un diámetro aproximado de 2 mm.
- Posteriormente se realiza una prueba de que el agua puede pasar por los agujeros de la base, esto permite respiración y prevención de alta saturación de material orgánico que conlleve al deterioro y estado de “pudrirse” en el proceso experimental.

Se preparan un total de 24 vasos; 21 para muestras, y 3 vasos para evaluar el sustrato utilizado y su respuesta a solo recibir agua, de esta manera se elimina la posibilidad de la incidencia de otra semilla o planta que haya sido transportado por medios naturales en la zona de estudio. El sustento de la cantidad de vasos se verá en los siguientes puntos.

4.1.2.2. Determinación de parámetros

El presente experimento es un análisis de identificación de la vegetación con las mejores cualidades para su aplicación en el experimento de fitorremediación, en tal punto la clave de este experimento es verificar el comportamiento exterior y sensible de las plantas a seleccionar.

Si bien existen muchos parámetros que se pueden tomar en cuenta, un punto clave aquí es entender que la selección debe ser óptima para llevar a cabo un adecuado proceso de fitorremediación y disminuir con ello la cantidad de pruebas a enviar para laboratorio, generando mayor eficiencia en la determinación de los parámetros adecuados para la aplicación de la fitorremediación y menores costos.

Los parámetros cualitativos a considerar serán detallados en el punto 4.1.3.2.

Por otro lado, estos parámetros pueden ser extrapolados a una escala real debido a que las condiciones de aplicación se realizaron en un cuarto de laboratorio a 1 km de la relavera, para el cuidado de las plantas, pero básicamente se contaba con la misma temperatura, altitud, presión atmosférica y todas las condiciones, es más, hasta se realizó el sembrío en una zona libre sin paredes para que el viento también sea parte de la prueba experimental.

4.1.2.3. Sustrato

Como el experimento de selección debe considerar solo la supervivencia y cualidades de las plantas en supervivencia, podemos tener una amplia gama de vasos de prueba.

Para la condición del sustrato a utilizar se tomó en cuenta investigaciones anteriores identificando una buena opción trabajar en una distribución; 70% mineral y 30 % humus-material orgánico. Se consideró un llenado del vaso al 75 % de su capacidad.

Se identificaron tres zonas potencialmente diferentes en comportamiento de afloramiento geológico en la zona de estudio. La extracción del relave fue realizada con los EPP's correspondientes y los permisos a los dueños de los terrenos superficiales.



Ilustración 6: Posición de las muestras según zona de extracción.

Fuente: (Google Earth, 2019) Fecha de consulta 21/05/2020



Ilustración 7:: Muestra 1, referido a zona de alta concentración de pirita



Ilustración 8: Muestra 2, referido a la quebrada en sí misma, zona de con DAM producido por lluvias temporales.



Ilustración 9: Muestra 3, referido a zona de materiales combinados entre relave y residuos sólidos de la población asentada

Es importante entender que debido a los años y a los procesos realizados el material “relave” extraído para análisis no es exclusivamente relave, sino que presenta ya afectaciones físico-químicas que en algunos casos desconocemos por falta de una base de datos histórica.

Primero, la Muestra 1, es un ejemplar extraído de dónde alguna vez estuvo ubicada la planta de relleno de la minera, entonces el relave de esta zona no solo contiene material de relave, sino que heterogéneamente también agregados para relleno.

La Muestra 2, es un ejemplar de la cuenca baja de la quebrada Corte Ladrones, esta zona es potencialmente heterogénea sustentado en que en las temporadas de la lluvia es muy común la generación de DAM (Drenaje Ácido de Mina). El DAM se evidencia observablemente, el comportamiento de color blanquecino posterior a su resequedad y la facilidad de porosidad asociado a un comportamiento esponjoso del paso del DAM es evidente. Entonces se desconoce si el paso de DAM a lo largo de los años ha aumentado la toxicidad del suelo o la ha disminuido, esto en evidencia de que la propia base de la cuenca también contiene relave ya afectado físico-químicamente.

Por último, para el caso de la Muestra 3 está ubicada en una zona donde la población ya depósito ciertos residuos de labores de construcción, como restos de cemento, ladrillos, tierra, etc. Se debe tener en cuenta que, a pesar de esta combinación, esta muestra tenía presencia de un alto porcentaje de pirita en tamaños mínimos.

En conclusión, claramente se puede esperar un comportamiento diferente de cada una de estas muestras, por tal punto se consideraron utilizarlas en pruebas para identificar en cuál de las 3 hay mayor dificultad para la evolución de las plantas en análisis. Se muestran las tablas para el cálculo de densidades por metodología de cálculo con uso de volúmenes completados con agua destilada, aprovechando la facilidad del agua para mezclarse como solvente en una solución para determinar de esa manera las densidades de cada muestra. Para no tener dudas con los resultados, se realizó las mediciones de Mineral Poroso y Mineral con Agua 3 veces

En cuanto al material orgánico, fue adquirido de un centro de ventas de materiales para sembrío, su base principal es de lombrices en tierra combinado con residuos fecales de aves, su pH promedio a tres pruebas es de 7,3 lo que indica un poco de basicidad.

En la Tabla 7: Calculo de densidad Relave, Muestra Humus Real Tabla 7 se puede observar que los datos requeridos y los resultados obtenidos para las densidades respectiva de cada muestra, característica clave para la identificación de pesos distribuidos en cada uno de los 24 vasos. Se tiene como base el uso del mismo sustrato y en la misma cantidad para todos los recipientes con la distribución de pesos indicada en la Tabla 8.

Tabla 4: Calculo de densidad Relave, Muestra 1

M1	Volumen Total(cm3)	Masa(g)	Volumen H2O (cm3)	Densidad(g/cm3)
Agua	150	150	150	1.00
Relave Esponjado	150	279	0	1.86
Relave con agua	150	344	65	2.29
Relave real	85	279	0	3.28

Tabla 5: Calculo de densidad Relave, Muestra 2

M2	Volumen Total(cm3)	Masa(g)	Volumen H2O (cm3)	Densidad(g/cm3)
Agua	150	150	150	1.00
Relave Esponjado	150	254	0	1.69
Relave con agua	150	320	66	2.13
Relave real	84	254	0	3.02

Tabla 6: Calculo de densidad Relave, Muestra 3

M3	Volumen Total(cm3)	Masa(g)	Volumen H2O (cm3)	Densidad(g/cm3)
Agua	150	150	150	1.00
Relave Esponjado	150	242	0	1.61
Relave con agua	150	306	64	2.04
Mineral real	86	242	0	2.81

Tabla 7: Calculo de densidad Relave, Muestra Humus Real

Humus	Volumen Total(cm3)	Masa(g)	Volumen H2O (cm3)	Densidad(g/cm3)
Agua	150	150	150	1.00
Humus Esponjado	150	108	0	0.72
Humus con agua	150	171	63	1.14
Humus real	87	108	0	1.24

Obtenida las densidades, podemos calcular la masa necesaria para cada muestra.

Tabla 8: Distribución de Masas para Muestra 1, 2 y 3, experimento de selección

	Vol. Humus(cm3)	Masa Humus(g)	Vol. Relave(cm3)	Masa Relave	Volumen Total(cm3)	Masa total(g)
Relave (70%) M1- Humus (30%)	116.12	144.15	102.47	336.35	218.59	480.50
Relave (70%) -M2 Humus (30%)	111.65	138.59	106.95	323.39	218.59	461.98
Relave (70%) -M3 Humus (30%)	107.72	133.72	110.88	312.00	218.59	445.72

Un punto a indicar es que el volumen considerado es para sustrato compacto, lo que no sucede al momento de colocar el sustrato en los recipientes, ya que este sustrato este esponjado, según pasen los días el sustrato se asentará, pero no al 75% de volumen exactamente ya que siempre queda un poco de porosidad.

4.1.2.4. Vegetación

Para la selección de plantas que pasaran a ser objeto de estudio en el experimento de fitorremediación, vamos a delimitar las consideraciones para las plantas:

- No deben ser plantas con frutos comestibles que involucren un cambio sustancial en la cadena alimenticia y por lo tanto el traslado de los metales pesados a otro ser vivo.
- No deben ser plantas con alta masa o peso que involucren una afectación a la estabilidad física de los taludes para su posterior posibilidad aplicativa en la realidad.
- Deben pertenecer al entorno aplicativo comercial o de procedencia étnica de la zona, Santa Cruz de Cocachacra, para facilitar su sembrío posterior.

En base a estos principios se determinó trabajar con flores ornamentales, con 7 especies comerciales de la zona. Los detalles de las mismas pueden ser visualizados en la Tabla 9.

Tabla 9: Sobre las plantas a estudiar en el experimento de selección

Planta	Nombre Científico	Familia
Girasol	Helianthus annuus	Asteraceae
Aster	Aster Alpinus	Asteraceae
Clavel Chino	Tagete	Asteraceae
Cosmos	Cosmos bipinnatus	Asteraceae
Dogo	Antirrhinum	Plantaginaceae
Alhelí	Erysimum cheiri	Brassicaceae
Cresta de Gallo	Celosia	Amaranthaceae

Para añadir, si bien no fue una consideración a tomar en cuenta para la selección de especies en estudio, las plantas presentadas han tenido estudios precedentes, y para el caso del *Helianthus annuus* (girasol) y *Cosmos bipinnatus* (cosmos) hasta han sido estudiadas para el caso de remediación en otras zonas de la Unidad Minera.

4.1.3 Diseño experimental

4.1.3.1 Parámetros para evaluar

Como se indicó en el punto 4.1.2.2 este experimento identifica parámetros comparativos cualitativos, ya que el principal fin de este experimento es identificar las plantas con la mejor facilidad para desarrollarse en el sustrato a utilizar. El experimento tuvo una duración de 60 días, y los resultados finales son valores comparativos al momento de realizada la evaluación de los parámetros.

En ese punto se están considerando un total de 6 factores cualitativos considerando la comparación relativa con la muestra de la misma especie, pero identificando cualidades que evidencien realmente su desarrollo, además para una comparación con *n* términos reales se sembró semillas en un macetero de tierra fértil con mucha accesibilidad para el crecimiento y de esa manera tener una guía fiable comparativa de condiciones óptimas. Los 6 factores se pueden observar en la Tabla 10.

Los factores Tamaño de hojas, raíces y altura se miden en centímetros, la comparación de estos valores será de forma relativa entre las plantas de la misma especie y tomando como máximo relativo a la planta que crece en condiciones óptimas, se entiende que más importante que las medidas insitu es la comparación relativa, ya que no queremos saber el tamaño de las plantas, sino que tan bien se desarrollan respecto a las demás especies en otras muestras. Se tomará 0 si es que la planta está muerta al momento de la evaluación.

La velocidad de germinación se determina por los días que demora la semilla en brotar del suelo y ser lo más mínimamente visible. Fechas de aparición visual de las plantas:

- Muy Alto (5) si germina antes de los 10 días.
- Alto (4) si germina antes de los 13 días y después de 10 días.
- Medio (3) si germina antes de los 16 días y después de los 13 días.
- Bajo (2) si germina antes de los 19 días y después de los 16 días.
- Muy (1) bajo se germina después de los 19 días.

Si la planta no llega a germinar su valoración será 0 para todos los demás indicadores.

Volumen de biomasa está referido a la capacidad de creación de biomasa de la planta, y en resumen es un agregado que corresponde a la influencia en volumen de la planta que cuanto más altura y radio de influencia tenga, mayor capacidad de creación de biomasa también existirá, este factor es clave para identificar la mejor planta porque nos indicará cuál de las plantas presentadas no solo extraería el material, sino que al crear biomasa está sería parte de un proceso acumulativo para la obtención de una capa de suelo con condiciones favorables en el futuro.

El factor tiempo de vida relaciona dos variables; primero, los días que la planta estuvo o está viva, y segundo, la condición actual de la planta refiriéndose a su estado, en otras palabras, si tiene dificultades para sobrevivir. Debido a la corta duración del experimento este factor tiene una valoración comparativa cualitativa más que cuantitativa y se define con la siguiente valoración:

- 2 significa que la planta germinó, pero murió.
- 3 significa que está listo para cosecha (poca probabilidad de vivir).
- 4 significa que está vivo y tiene fortaleza

Tabla 10: Parámetros y sistema de evaluación por parámetros para Análisis Cualitativo. Experimento de selección.

	ANALISIS	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
	CUALITATIVO					
F1	Tamaño de las hojas	1	2	3	4	5
F2	Raíces	1	2	3	4	5
F3	Velocidad de Germinación	1	2	3	4	5
F4	Volumen de biomasa	1	2	3	4	5
F5	Altura	1	2	3	4	5
F6	Tiempo de vida*	2	2	3	4	4

4.1.3.2 Descripción de proceso experimental

El experimento de selección tiene como fin identificar las plantas con la mejor viabilidad para fitorremediar el suelo, para ellos es importante su consistencia y desarrollo en las condiciones agrestes del relave. Para tal fin se ha seguido el procedimiento:

- a. Según las consideraciones mencionadas en el punto de vegetación se decidió utilizar *Helianthus annuus*, *Aster Alpinus*, Tagete, *Cosmos bipinnatus*, *Antirrhinum*, *Erysimum cheiri* y *Celosia*.
- b. Se diseñan recipientes según el guía de diseño de recipientes, en total 24 vasos.
- c. Se procede a obtener el relave, para ello se realiza su extracción de la relavera, para todo el proceso se utiliza EPP's.
- d. Se calcula las densidades y con ello los pesos correspondientes para la distribución 70-30% que se utilizará para las 24 muestras, 7 muestras de cada lugar de extracción de relave haciendo un total de 21 que sumado a las 3 muestras comparativas tenemos un total de 24.
- e. Se aplica la metodología de sembrío cuidadosamente, y posterior empezar el monitoreo continuo. El régimen de riego es 45 cm³ durante todo el proceso.
- f. La evaluación cualitativa se realiza a los dos meses de iniciado el proyecto, se toman los mismos parámetros, con mucho cuidado todas las mediciones para realizar una comparación objetiva. Posteriormente se utiliza la calificación presente en la Tabla 10 esto con el fin de obtener puntajes finales acumulados por planta. Con los puntajes acumulados por planta se escogen las dos plantas con mayor puntaje para el experimento de fitorremediación.

4.1.4 Registro de Data

4.1.4.1 Registro de condiciones iniciales

No hay datos comparativos iniciales ya que todas las muestras tienen las mismas condiciones, en tal punto, se presentan a continuación las condiciones de tratamiento y condiciones ambientales generales para todas las muestras.

Fecha de Inicio de Experimentación: 9 de junio del 2020, día 0.

Temperatura promedio: 9/17 °C

Horario de Riego diario: 20:00-21:00 horas

Volumen de riego por planta: 70 cm³

4.1.4.2 Registro de condiciones finales:

El registro de condiciones finales se realiza 60 días posterior a iniciar con las siguientes consideraciones generales:

Fecha de evaluación: 08/08/2020

Hora de evaluación: 14:00 horas

En el apartado 4.1.3.1 se indicaron los 6 factores a tomar en cuenta para el registro de condiciones finales, de ese modo obtenemos:

Tabla 11: Sobre el registro de condiciones finales (evaluación cualitativa) para la Muestra 1

Planta	F1	F2	F3	F4	F5	F6	TOTAL
Girasol	0	0	2	0	0	0	2
Aster	0	0	0	0	0	0	0
Clavel Chino	5	5	3	2	4	4	23
Cosmos	5	5	2	0	5	4	21
Dogo	1	2	4	1	2	3	13
Alhelí	4	4	3	2	3	4	20
Cresta de Gallo	0	0	3	0	0	0	3

Tabla 12: Sobre el registro de condiciones finales (evaluación cualitativa) para la Muestra 2

Planta	F1	F2	F3	F4	F5	F6	TOTAL
Girasol	0	0	4	0	0	0	4
Aster	0	0	4	0	0	0	4
Clavel Chino	0	0	4	0	0	0	4
Cosmos	3	4	4	0	5	4	20
Dogo	5	4	5	2	4	4	24
Alhelí	5	5	5	2	5	4	26
Cresta de Gallo	2	2	5	1	2	3	15

Tabla 13: Sobre el registro de condiciones finales (evaluación cualitativa) para la Muestra 3

Planta	F1	F2	F3	F4	F5	F6	TOTAL
Girasol	0	0	0	0	0	0	0
Aster	0	0	0	0	0	0	0
Clavel Chino	2	2	3	2	2	3	14
Cosmos	3	3	3	1	3	3	16
Dogo	5	5	3	1	4	4	22
Alhelí	0	0	0	0	0	0	0
Cresta de Gallo	0	0	2	0	0	0	2

Posterior a evaluar cada una de las plantas con cada uno de los factores, se obtienen resultados totales por Muestra, estos resultados se suman y se obtiene una valoración final, en este caso la valoración final esta escalada por colores.

Tabla 14: Sobre las valoraciones finales (evaluación cualitativa) por planta

PLANTA	VALORACIÓN FINAL
Girasol	6
Aster	4
Clavel Chino	41
Cosmos	57
Dogo	59
Alheli	46
Cresta de Gallo	20

4.2 EXPERIMENTO DE FITORREMEDIACIÓN

4.2.1 Metodología

4.2.1.1 Metodología general

Para el proceso de fitorremediación se siguió la metodología:

- a. Se realiza la selección de semillas, para ello se limpia las impurezas en las semillas para evitar presencia de otras plantas que puedan alterar los resultados del experimento. También se sugiere aplicar el método de verificación de buen estado de semillas con un vaso de agua, al igual que en el experimento de selección, y si las semillas flotan es porque están secas o no se han desarrollado.
- b. Segundo, se preparan los recipientes y sustratos. Los sustratos deben ser mezclados lo más posible para aproximar una mezcla homogénea, no retirar rocas compactas o grumos ya que son parte del experimento para su aproximación a la realidad.
- c. Se realiza el sembrío de las semillas en los recipientes con las distintas distribuciones para dar inicio al proceso de fitorremediación.
- d. Se registran las condiciones iniciales del medio en el que se está realizando el sembrío, así como, el número de semillas colocadas en los recipientes.
- e. Se realiza el monitoreo mensual de los parámetros cualitativos (para las plantas) y cuantitativos (para el suelo más relave).
- f. Se realizan los ensayos de determinación de metales pesados para la etapa inicial y final del experimento. Además, se registra el porcentaje que ha fitorremediado las plantas al medio en el que fue sembrado.
- g. Por último, se cosechan las plantas y se procede a realizar el manejo del material contaminado con su correspondiente cuidado.

4.2.1.2 Metodología de sembrío

Para el sembrío del Cosmos:

- Se realizan pequeños orificios a 5 cm de la superficie en el medio para colocar las semillas (30-35 semillas) del cosmos en ellos.
- Se plantan las semillas de forma radial espaciadas 0.5 cm * hasta llegar al límite del recipiente como se muestra a continuación.

Se vuelven a cubrir las con el material (relave + hummus).

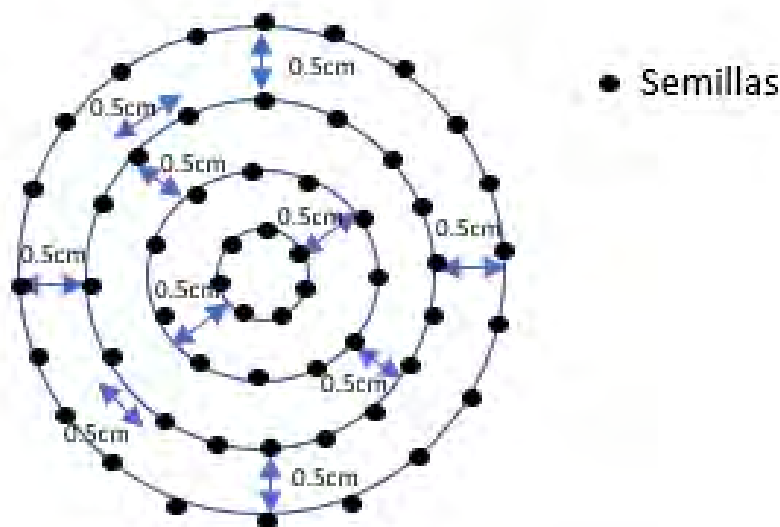


Ilustración 10: Distribución de semillas de Cosmos, experimento de fitorremediación

Para el sembrío del Dogo:

- Se realizan pequeños orificios a 5 cm de la superficie en el medio para colocar las semillas (70-85 semillas) del dogo en ellos.
- Es importante hacer unos soportes para colocar las semillas y evitar que se hundan y se pierdan, los soportes pueden ser de polietileno (plástico reciclado) o cartón.
- Se plantan las semillas de forma radial espaciadas 0.5 cm * hasta llegar al límite del recipiente como se muestra en la parte baja.
- Se vuelven a cubrir las con el material (relave + hummus).

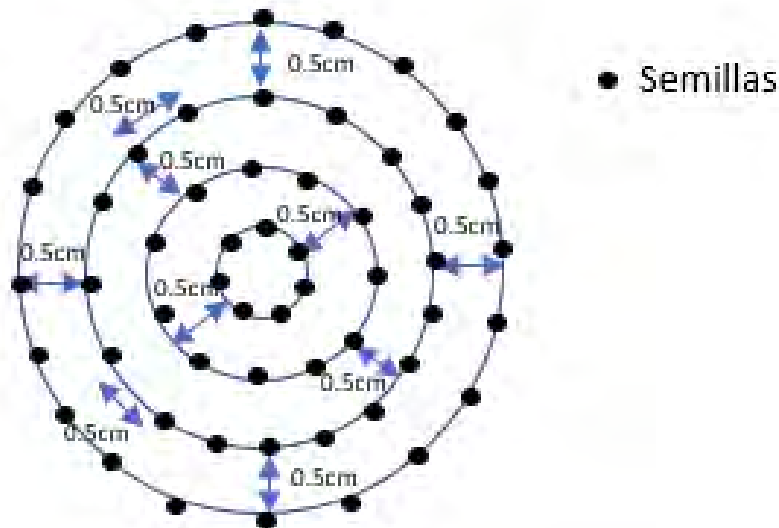


Ilustración 11: Distribución de Semillas de Dogo, experimento de fitorremediación

*En ambos casos, este espaciamento no es el adecuado si se quisiera esperar todo el crecimiento de la planta ya que deberían ir espaciadas según su radio de influencia, pero se planta así solo para un estudio temprano de fitorremediación y análisis de comparación cualitativa a nivel laboratorio.

4.2.1.3 Metodología de detección de Metales Pesado

Uso de la siguiente metodología:

- Toma de muestras por cuarteo.
- Transporte de muestras.
- Descripción del procedimiento de análisis

1. Las muestras fueron llevadas primero a digestión acida. Se pesó una pequeña muestra representativa sobre vaso de precipitados de 250 mL y se le agregó 10mL de HNO₃ cc, se llevó sobre plancha de calentamiento a 95 C por 30 minutos, hasta la eliminación de vapores nitrosos.
2. Luego, se agregó 5mL de HCl cc seguido de 5 mL de HNO₃ cc observándose también salida de vapores nitrosos por espacio de 50 minutos. Se dejó en la plancha hasta la formación de una muestra pastosa de color amarillo, casi a sequedad.
3. Se dejó enfriar el vaso con la muestra y se agregó 20 mL de HNO₃ cc al 10% v/v. Se llevó nuevamente a la plancha justo hasta hervir, se filtra sobre papel Whatman 42 en fiola de 25 mL y se enrasa hasta la marca con agua destilada.
4. Finalmente, se leen las muestras en su contenido de Cadmio y Plomo por absorción atómica a la flama en equipo VARIAN 240. (Toledo Rodriguez, 2020)

-Cálculo de las concentraciones de metales pesados.

4.2.2 Diseño y construcción de recipientes para fitorremediación

4.2.2.1. Construcción de recipiente

Los recipientes para realizar la fitorremediación se construyeron con las siguientes características:

- Se utilizan envases de reciclaje, con un radio de 17.5 cm, altura de 25 cm.
- En el fondo de los vasos se realizan 4 orificios del mismo tamaño con un diámetro aproximado de 3 mm.
- Posteriormente, al igual que en el experimento de selección se realiza una prueba de que el agua puede pasar por los agujeros de la base, esto permite respiración y prevención de alta saturación de material orgánico que conlleve al deterioro y estado de “podrirse” en el proceso experimental.
- En el caso de usar estos envases reciclados, se sugiere utilizar una lija para reducir la aspereza de las esquinas que no solo pueden ser peligrosas para el experimentador, sino pueden cortar las plantas en su crecimiento. Otra posibilidad es derretir la zona de corte cuidadosamente.

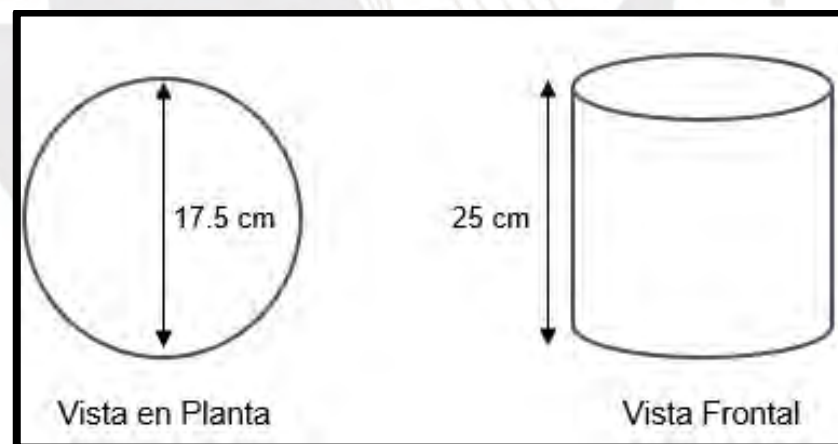


Ilustración 12: Vista en planta y frontal de recipientes, experimento de fitorremediación



Ilustración 13: Recipientes de plástico reciclados

Se realizó la construcción de 8 envases, para los cuales diseñamos distintas distribuciones entre contenido mineral y material orgánico-hummus (distribuciones en peso). Obteniendo así las siguientes clasificaciones para los envases:

Tabla 15 Distribuciones de Relave- Hummus por envase:

Planta n°1: Cosmos	Planta n°2: Dogo
Envase 1: 80% relave– 20% hummus	Envase 5: 80% relave – 20% hummus
Envase 2: 70% relave – 30% hummus	Envase 6: 70% relave – 30% hummus
Envase 3: 60% relave – 40% hummus	Envase 7: 60% relave – 40% hummus
Envase 4: 0% relave – 100% hummus	Envase 8: 0% relave – 100% hummus

A continuación, se muestran los recipientes en su etapa de inicial y de construcción para dar inicio al proceso de fitorremediación:



Ilustración 14: Recipientes iniciales preparados



Ilustración 15: Proceso de Llenado de Recipientes



Ilustración 16: Recipientes distribuidos

4.2.2.2.

Determinación de parámetros

El presente ensayo tiene la finalidad de evaluar a partir de las plantas escogidas en el “experimento de selección” cuál es la opción que nos provee mayor remediación de los suelos, para ello se decidió evaluar: el porcentaje de remediación de los suelos (en metales pesados, para el presente trabajo el análisis es de cadmio y plomo), así como el pH del medio y el monitoreo del desarrollo de las plantas consideradas para la aplicación de la fitorremediación. Por ello, se decidió realizar tanto un análisis cuantitativo (centrado en el análisis del relave más el hummus) como uno cualitativo (características físicas de la planta); se detalla sobre los parámetros considerados en el punto 4.1.3.1.

4.2.2.3. Sustrato

Una vez finalizado el experimento de selección, uno de los resultados fue:

- La muestra N° 1 es la más crítica y con mayor dificultad para el desarrollo de las especies fitorremediadoras.

En dicha zona encontramos presencia de minerales con contenido de hierro, plomo, entre otros; así mismo, dicha zona es donde se encontraba ubicada la planta de relleno, por lo que se desconoce la variedad mineralógica, contaminantes y reactivos adicionales. Este es el motivo por el cual esta muestra al ser la más crítica brinda un análisis general de fitorremediación.

Se utilizó las siguientes cantidades en cada recipiente, según sus distribuciones:

Tabla 16: Sobre los volúmenes esponjados finales y material requerido para cada recipiente:

Recipientes		Masa(g)	Volumen (cm ³)	Volumen (cm ³)	Volumen Esponjado (cm ³)	Volumen Esponjado (cm ³)
Envase 5:	Relave	6000	1827.96	3036.29	3225.81	4904.05
80% relave – 20% hummus	Hummus	1500	1208.33		1678.24	
Envase 6:	Relave	5250	1599.46	3411.96	2822.58	5339.94
70% relave – 30% hummus	Hummus	2250	1812.50		2517.36	
Envase 7:	Relave	4000	1218.64	3366.79	2150.54	5134.08
60% relave – 40% hummus	Hummus	2666.7	2148.15		2983.54	
Envase 8:	Relave	0	0.00	3625.00	0.00	5034.72
0% relave – 100% hummus	Hummus	4500	3625.00		5034.72	

Estos volúmenes solo están en función a su relación.

4.2.2.4. Vegetación

Finalizado el experimento de selección de plantas, se determinó que las condiciones óptimas para llevar a cabo el experimento de fitorremediación en el suelo de la muestra 1 son el cosmos y el dogo. A continuación, se describirán dichas plantas:

Tabla 17: Características Cosmos Bipinnatus y Antirrhinum

Cosmos	Dogo
Su nombre científico es Cosmos bipinnatus, pertenece a la familia Asteraceae, las principales características que tiene son:	Su nombre científico es Antirrhinum, pertenece a la familia Plantaginaceae, las principales características que tiene son:
<ul style="list-style-type: none"> - Altura entre 50 cm y 1 metro - Flores miden 5-6.5 cm radial - Resistentes a plagas - Adecuado en clima templados - Brote de semillas entre 4 a 10 días. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altura entre 50 cm y 1 metro - Flores miden 7-8 cm de largo - De uso medicinal - Adecuado en clima templados - Brote de semillas entre los 10 a 15 días.

4.1.3 Diseño experimental

4.1.3.1 Parámetros para evaluar

4.1.3.1.1 Parámetros cualitativos

Los parámetros cualitativos están abocados a tener un control, monitoreo y registro de cómo se van desarrollando las plantas escogidas (cosmos, dogo) en el medio a lo largo del desarrollo del experimento. A diferencia del primer experimento, en este no haremos una comparación relativa por valoraciones y puntajes, sino que más bien se anotaran los valores sustanciales.

Se evalúan 8 parámetros, 6 para análisis de evolución y dos parámetros de estado sustancial para verificar la supervivencia de la planta en cada distribución.

De los primeros 6 parámetros referidos a la evolución de las plantas son el tamaño de las hojas, la altura, espesor de tallo, radio de influencia por planta, las raíces y número de plantas; cualidades que además están relacionadas con la capacidad de creación de

biomasa, factor que ya no es tomado en cuenta por que se ah disgregado casi todas sus variables dependientes. Estas variables serán analizadas en gráficas comparativas con el fin de identificar las condiciones óptimas. A excepción del número de plantas, todas las demás variables se miden en centímetros.

Los tres últimos parámetros están relacionados al estado de supervivencia de las plantas; el primero es el estado al momento de evaluación que se adjunta dentro de los demás factores cualitativos. Los dos últimos factores son el tiempo de brote de las semillas y la supervivencia, como tal, representada en días, estos dos últimos factores solo tienen un dato por lo que es una data aparte.

Tabla 18: Listado de parámetros cualitativos, experimento de fitorremediación

	Parámetros Cualitativos	Unidades
Toma de Data mensual	Tamaño de hojas	x cm
	Altura	x cm
	Espesor de tallo	x cm
	Número de plantas	#
	Radio de influencia por planta	x cm
	Raíces	x cm
	Condición	#
Toma de Data única	Días de demora para brote de las semillas	#
	Días de supervivencia	#

4.1.3.1.2 Parámetros cuantitativos

Los parámetros cuantitativos están abocados a tener un control, monitoreo y registro de cómo se va fitorremediado el medio, así como van cambiando el pH del mismo a lo largo del desarrollo del experimento.

El requerimiento de agua es un factor clave para identificar costeos futuros y dependencia de las plantas, este factor está dividido en dos partes: volumen de riego(cm³) y frecuencia de riego(x).

Para la detección de pH, se utiliza un pH metro de operación manual con código PH-107. Para la determinación del pH se utilizó la metodología indicada en el apartado **4.2.1.3**.

Para el caso del porcentaje de Plomo y porcentaje de Cadmio se utiliza el método de absorción atómica.

Tabla 19: Listado de parámetros cualitativos, experimento de fitorremediación

Parámetros	Distribución
Requerimiento de agua	cm ³ –cada “x” días
pH	#
Porcentaje de Plomo	%
Porcentaje de Cadmio	%

4.1.3.2 Descripción de proceso experimental

El proceso experimental que tuvo el siguiente procedimiento:

- Primero, se preparan los recipientes y los sustratos correspondientes con las distribuciones de relave y hummus.
- Se realiza el sembrado de las semillas de dogo y cosmos, siguiendo la metodología de sembrado indicada en 4.2.1.2.
- Se realiza la toma de data inicial (cuantitativa y cualitativa), la cual consiste para el caso cuantitativo en registro de la cantidad de metales pesados (plomo y cadmio) y el registro del pH en el que se encontraban las distribuciones y el relave puro. Para el caso cualitativo consiste en el registro de las semillas plantadas en el medio.
- Luego, el siguiente monitoreo realizado fue a un mes de iniciado el experimento, en dicho monitoreo se registra data cualitativa completa. Para la evaluación cuantitativa solo se toma el registro de pH. Ambos parámetros se desarrollaron a detalle en el punto 4.1.3.1.

- Finalmente, a dos meses de iniciado el experimento se volvió a realizar el monitoreo y control de nuestros parámetros cualitativos (para la planta) y cuantitativos (para el relave más suelo). En esta etapa se llevó a laboratorio las muestras para las distintas distribuciones para poder medir la cantidad de metales pesados que posee el suelo más relave una vez ejecutada la fitorremediación (Fito-extracción) en el periodo considerado.

4.1.4 Registro de Data

4.1.4.1 Registro de condiciones iniciales

De las muestras recolectadas para realizar el proceso de fitorremediación, se obtuvo la siguiente data cuantitativa

Tabla 20: Condiciones iniciales del Relave

Parámetros	Distribución 1 Material Orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org	Relave
pH	7.1	4.2	3.8	3.4	3.2
mg/kg de Plomo	4334.54				
mg/kg de Cadmio	24.11				

4.1.4.2 Registro de condiciones al mes

Transcurrido un mes desde el inicio del proceso de fitorremediación se realizó la recolección de datos tanto para los parámetros cuantitativos y cualitativos para ambas plantas trabajadas (dogo y cosmos). Obteniendo las siguientes tablas resúmenes como resultados:

Planta n°1 Cosmos:

Parámetros cualitativos:

Tabla 21: Evaluación de parámetros cualitativos al mes, Cosmos

Parámetros Cualitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
Tamaño de hojas	1.1 cm	0.9 cm	0.7 cm	0.6 cm
Altura	19 cm	7.5 cm	1.8 cm	1.1 cm
Espesor de tallo	0.4 cm	0.3 cm	0.2 cm	0.2 cm
Número de plantas	20 plantas	11 plantas	10 plantas	7 plantas
Radio de influencia	9 cm	4 cm	2 cm	1.1 cm
Raíces	18 cm	13 cm	7 cm	No visible
Condición	5	5	2	2

Parámetros cuantitativos:

Tabla 22: Evaluación de parámetros cuantitativos al mes, Cosmos

Parámetros Cuantitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
pH inicial	7.1	4.2	3.8	3.4
pH mes 1	7.1	6.4	5.7	4.6

Planta n°2 Dogo

Parámetros cualitativos:

Tabla 23: Evaluación de parámetros cualitativos al mes, Dogo

Parámetros Cualitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
Tamaño de hojas	1.0 cm	0.5 cm	0.3 cm	0.3 cm
Altura	1.2 cm	1.1 cm	1.0 cm	1.0 cm
Espesor de tallo	0.2 cm	0.2 cm	< 0.2 cm	< 0.2 cm
Número de plantas	+ 30 plantas	+30 plantas	+30 plantas	+30 plantas
Radio de influencia	2.1 cm	1.0 cm	0.9 cm	0.7 cm
Raíces	11 cm	8 cm	6 cm	3 cm
Condición	5	5	5	5

Parámetros cuantitativos:

Tabla 24: Evaluación de parámetros cuantitativos al mes, Dogo

Parámetros Cuantitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
pH inicial	7.1	4.2	3.8	3.4
pH mes 1	7.4	6.4	6	5.2

4.1.4.3 Registro de condiciones finales

Transcurrido el segundo mes desde el inicio del proceso de fitorremediación se realizó la recolección de datos tanto para los parámetros cuantitativos (pH, porcentaje de cadmio y porcentaje de plomo) y cualitativos para ambas plantas trabajadas (dogo y cosmos). Obteniendo las siguientes tablas resúmenes como resultados:

Planta n°1 Cosmos:

Parámetros cualitativos:

Tabla 25: Evaluación de parámetros cualitativos a los dos meses, Cosmos

Parámetros Cualitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
Tamaño de hojas	1.3 cm	1.0 cm	0.0 cm	0.0 cm
Altura	34.0 cm	31.0 cm	0.0 cm	0.0 cm
Espesor de tallo	0.5 cm	0.5 cm	0.0 cm	0.0 cm
Número de plantas	18 plantas	7 plantas	0 plantas	0 plantas
Radio de influencia	15.5 cm	18.5 cm	0.0 cm	0.0 cm
Raíces	18.0 cm	18.0 cm	0.0 cm	0.0 cm
Condición	4	3	0	0

Por otro lado, evaluamos el tiempo de germinación representado en su brote visible para ambas plantas en las distintas distribuciones, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 26: Tiempo de Germinación-Brote de Semilla y Muerte de plantas, Cosmos

COSMOS	Día	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
	4	Germinación-Brote de Semilla			
	7		Germinación-Brote de Semilla	Germinación-Brote de Semilla	
	8				Germinación-Brote de Semilla
	14				Muerte de planta
	23			Muerte de planta	

Parámetros cuantitativos:

Tabla 27: Evaluación de parámetros cuantitativos a los dos meses, Cosmos

Parámetros Cuantitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
pH inicial	7.1	4.2	3.8	3.4
pH mes 1	7.1	6.4	5.7	4.6
pH mes 2	7.1	6.1	5.2	4.1
Cadmio mg/kg	0.35	9.55	7.48	11.02
Plomo mg/kg	46.20	2370.76	2577.32	2664.47

Planta nº2 Dogo:

Parámetros cualitativos:

Tabla 28: Evaluación de parámetros cualitativos a los dos meses, Dogo

Parámetros Cualitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
Tamaño de hojas	4.8 cm	6.0 cm	3.0 cm	3.0 cm
Altura	19.0 cm	16.0 cm	9.0 cm	2.5 cm
Espesor de tallo	0.3 cm	0.3 cm	0.2 cm	0.1 cm
Número de plantas	70 plantas	27 plantas	47 plantas	8 plantas
Radio de influencia	8.5 cm	16.0 cm	9.0 cm	2.5 cm
Raíces	19.0 cm	15.0 cm	9.0 cm	3.0 cm
Condición	5	5	4	2

Tabla 29: Tiempo de Germinación-Brote de Semilla y Muerte de plantas, Dogo

DOGGO	Día	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
	10	Germinación- Brote de semilla			
12			Germinación- Brote de Semilla		
13				Germinación- Brote de Semilla	
15					Germinación- Brote de Semilla
56					Muerte de planta

Parámetros cuantitativos:

Tabla 30 : Evaluación de parámetros cuantitativos a los dos meses, Cosmos

Parámetros Cuantitativos	Distribución 1 Material orgánico	Distribución 2 60% relave - 40 % M.org	Distribución 3 70% relave - 30 % M.org	Distribución 4 80% relave - 20 % M.org
pH inicial	7.1	4.2	3.8	3.4
pH mes 2	7.2	4.8	4.3	3.9
Cadmio mg/kg	0.35	10.09	11.28	12.20
Plomo mg/kg	46.20	3571.43	2496.68	3773.74

Tabla 31: Sobre el requerimiento de agua por planta

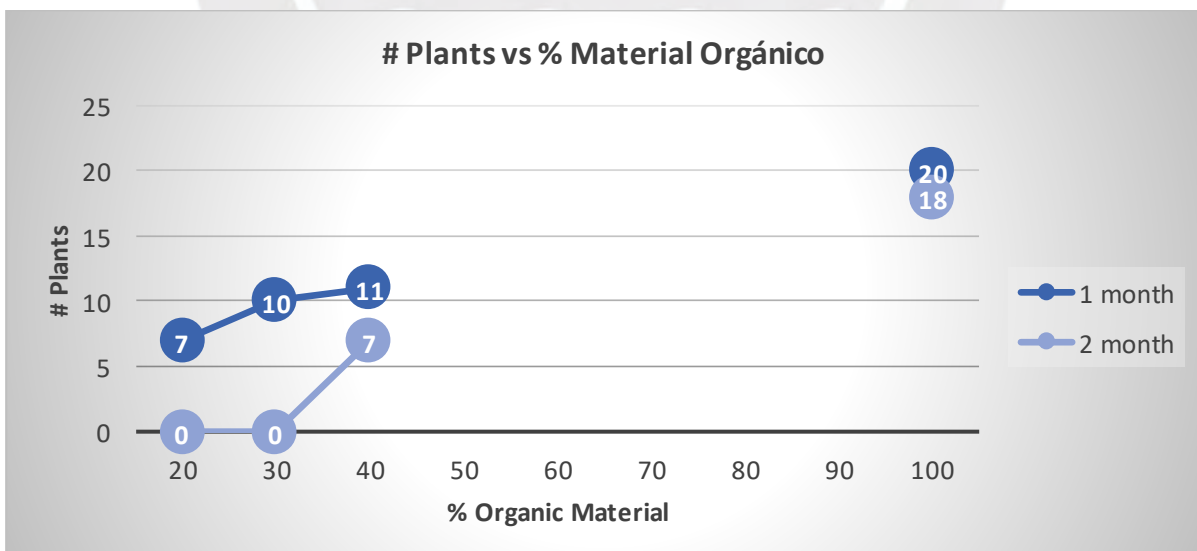
Día	Fecha	Volumen (ML) Requerimiento Cosmos	Volumen (ML) Requerimiento Dogo
1	29 08 2020	200	200
11	8 09 2020	250	250
21	18 09 2020	300	250
43	10 10 2020	350	300
60	27 10 2020	350	300

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

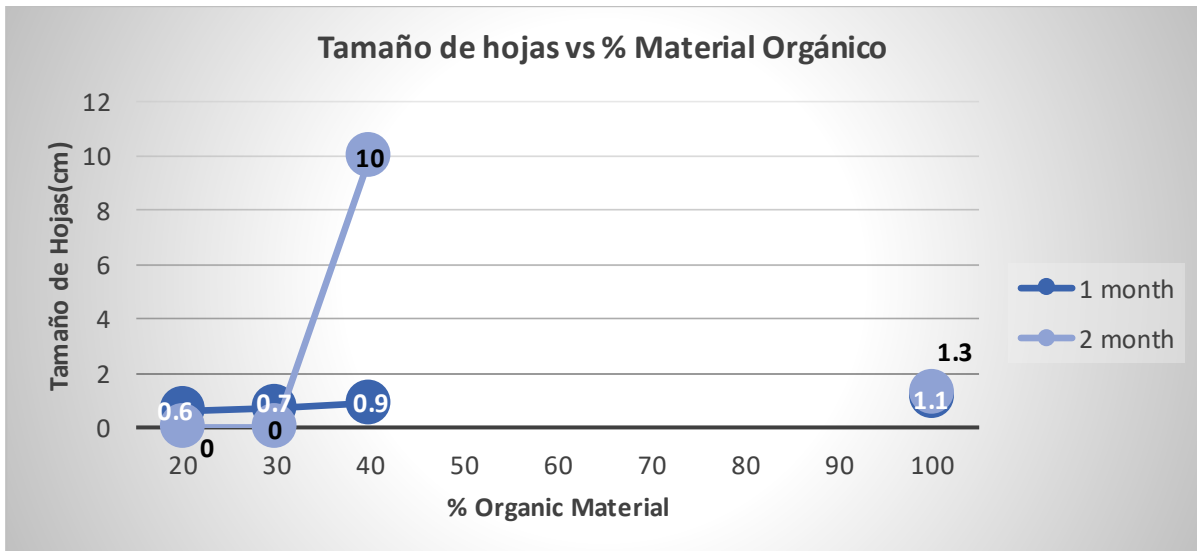
Los parámetros cualitativos se analizan individualmente por planta ya que es un comportamiento intrínseco de cada especie, pero que en líneas generales si presentan un comportamiento comparable final identificando si es propicio su sembrío dadas las condiciones difíciles del medio afectado por la presencia de relaves. Por otro lado, si bien el análisis del pH se realiza posteriormente, debe indicarse que, a mayor concentración de relave, la acidez también aumentaba, este factor es clave ya que es uno de los indicadores más influyentes en la supervivencia de las plantas.

Primero, el *Cosmos bipinnatus* (Cosmos) como especie correspondió al rango de días necesarios para su brote visible de germinación, escaladamente también correspondió a la calidad de suelo, mientras que en el caso del humus puro solo requirió 4 días, la distribución 80-20% demoró 8 días, visible en Tabla 26. El problema sucedió en que las plantas no se mantuvieron en pie mucho tiempo en las distribuciones 70-30% y 80-20%, razón por la cual el experimento a partir del día 23 solo fue con la consideración de desarrollo de la distribución 60-40%.

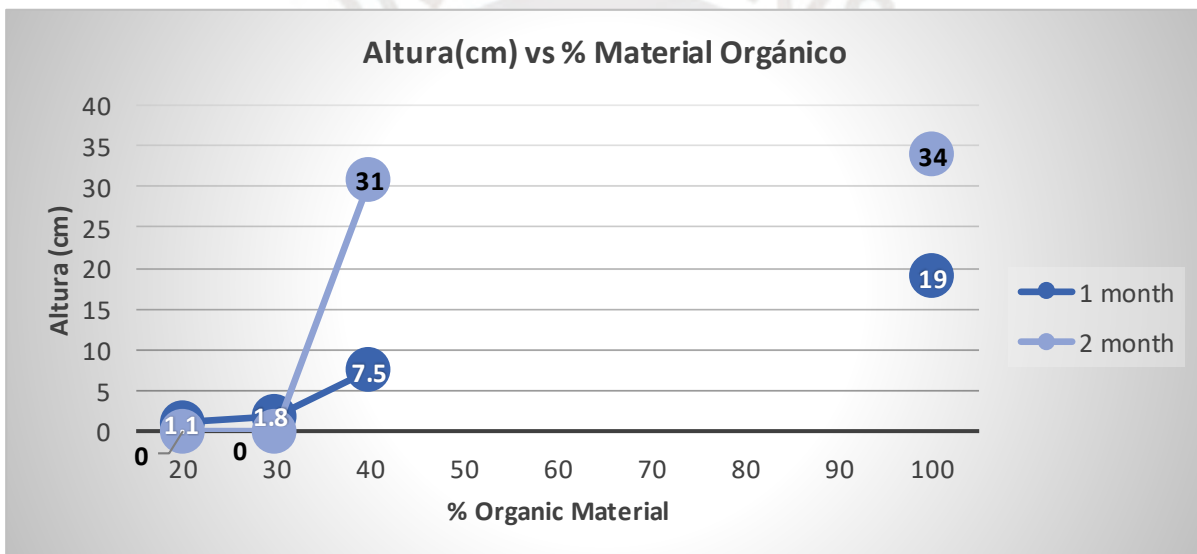
Además, como se observa en la Tabla N°31 tenemos un mayor requerimiento de agua, este requerimiento se adaptaba al estado diario de las plantas. La idea de este análisis diario era identificar el caudal necesario mínimo para el buen estado de las plantas, sin saturarlas ni tampoco perder su fuerza. Es importante entender que el indicador de necesidad de agua estaba basado en la humedad del suelo y en estado de las plantas.



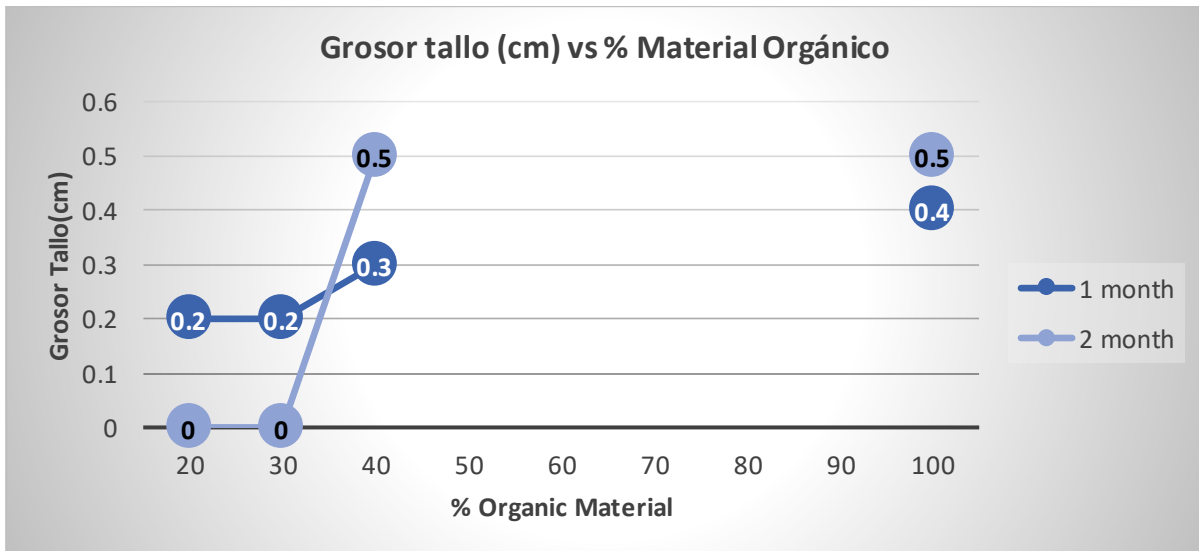
Gráficas 1: Evolución del número de plantas por cada distribución, Cosmos



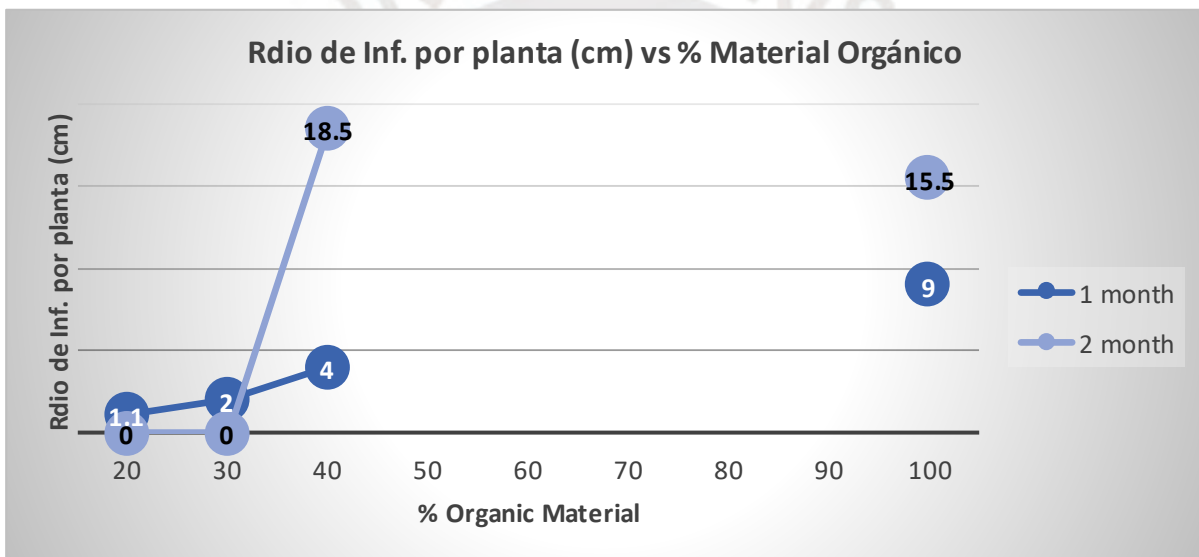
Gráficas 2: Evolución del tamaño de hojas por cada distribución, Cosmos



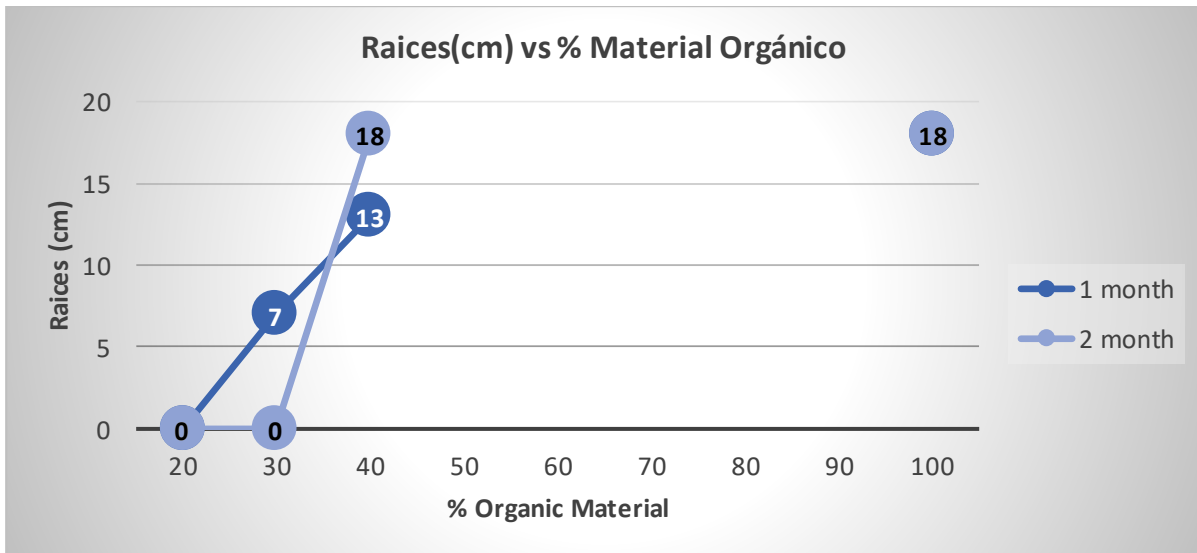
Gráficas 3: Evolución de la altura de las plantas por cada distribución, Cosmos



Gráficas 4: Evolución del grosor de tallo de las plantas por cada distribución, Cosmos



Gráficas 5: Evolución del radio de influencia por planta por cada distribución, Cosmos



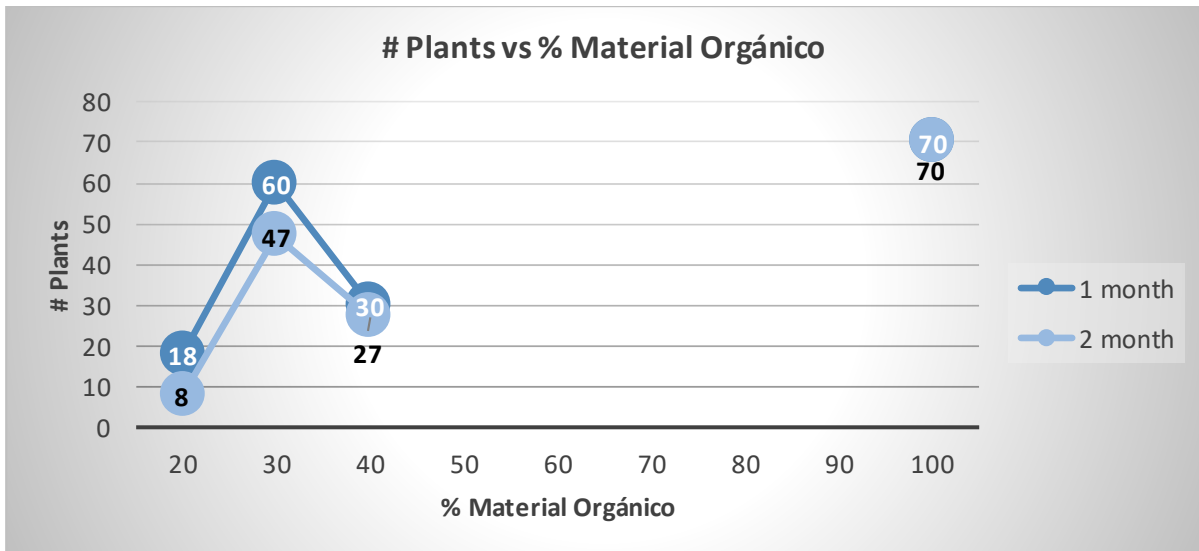
Gráficas 6: Evolución de la longitud de las raíces de las plantas por cada distribución, Cosmos

El Cosmos tenía mejoras sorprendentes para la distribución 60-40% respecto a las distribuciones 80-20% y 70-30%, pero a pesar de ello su evolución no fue la mejor en las condiciones dadas con el uso de la Muestra 1 (relave con alta concentración de metales), si bien el experimento de selección lo califico con alto puntaje, a la hora de la aplicación del experimento de fitorremediación se evidencio que el cosmos tenía dificultades para desarrollarse en el medio Factor clave a indicar es que si bien las plantas no se desarrollaban y morían, su germinación era dable por lo que está planta podría adaptarse con otra metodología de sembrío, y es más, germinaba con mayor rapidez y fuerza que el dogo al inicio de su vida.

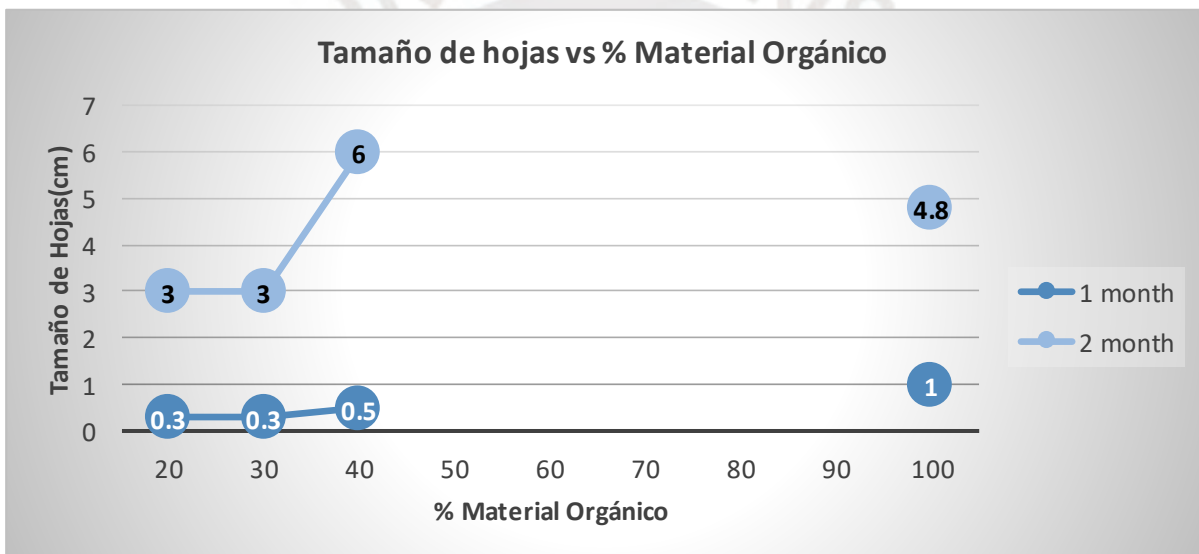
Por otro lado, un punto a rescatar del cosmos es su potencial biomásico, tiene un radio de influencia, tallo y raíces muy proliferantes que coincidente solicitaban mayor agua.

Para el caso del Antirrhinum (Dogo) tenemos una variante en la respuesta de días de germinación representada en el brote de semillas acorde a sus promedios esperados, con 10 días para el material orgánico y 15 días para el sustrato con el mayor porcentaje de relave, 80-20%.

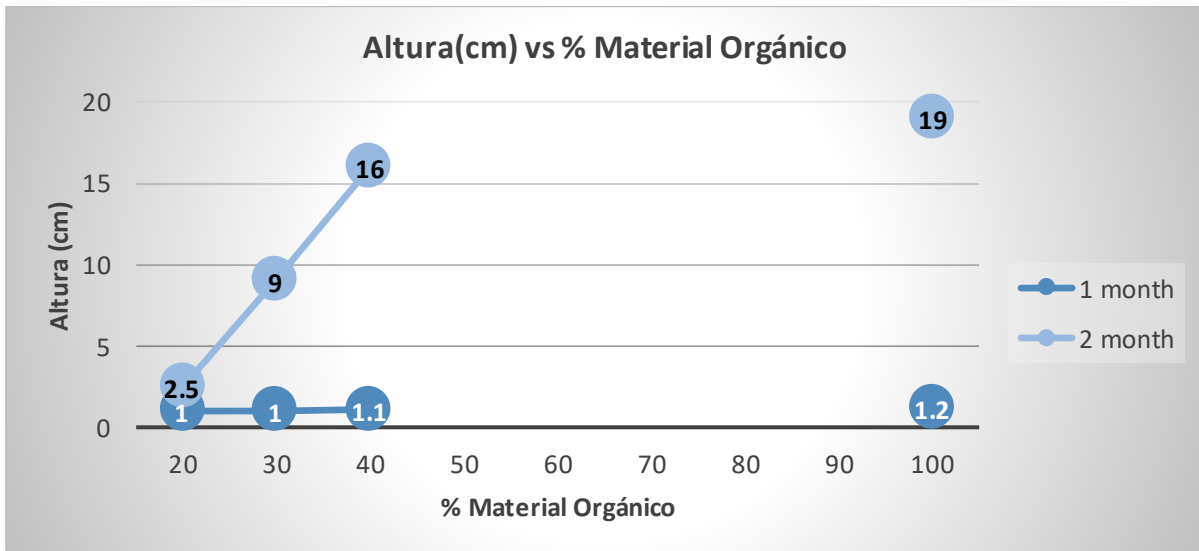
El dogo germinó y creció en las tres muestras, pero en la distribución 80-20% no se desarrolló, las razones son la poca profundidad de las raíces y alta acides del medio. Al día 56 la distribución 80-20 termino con la muerte de la planta.



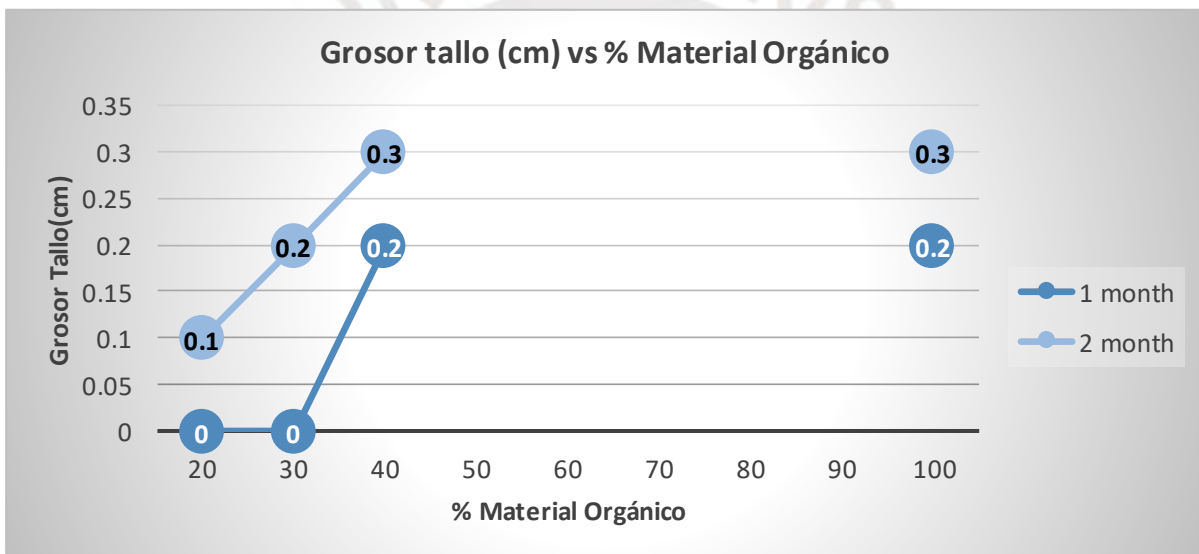
Gráficas 7: Evolución del número de plantas por cada distribución, Dogo



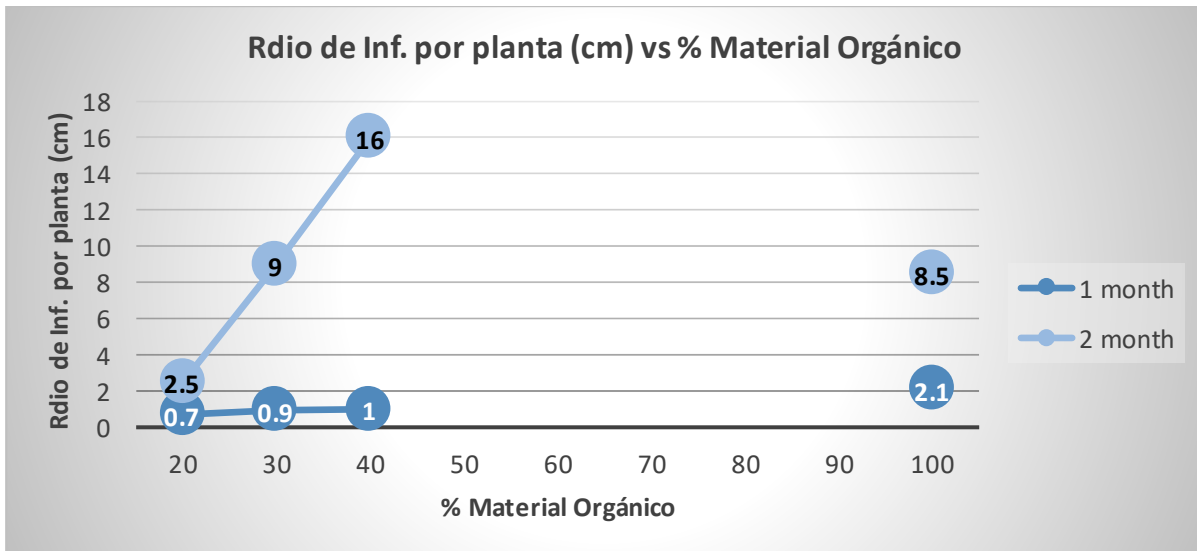
Gráficas 8: Evolución del tamaño de hojas por cada distribución, Dogo



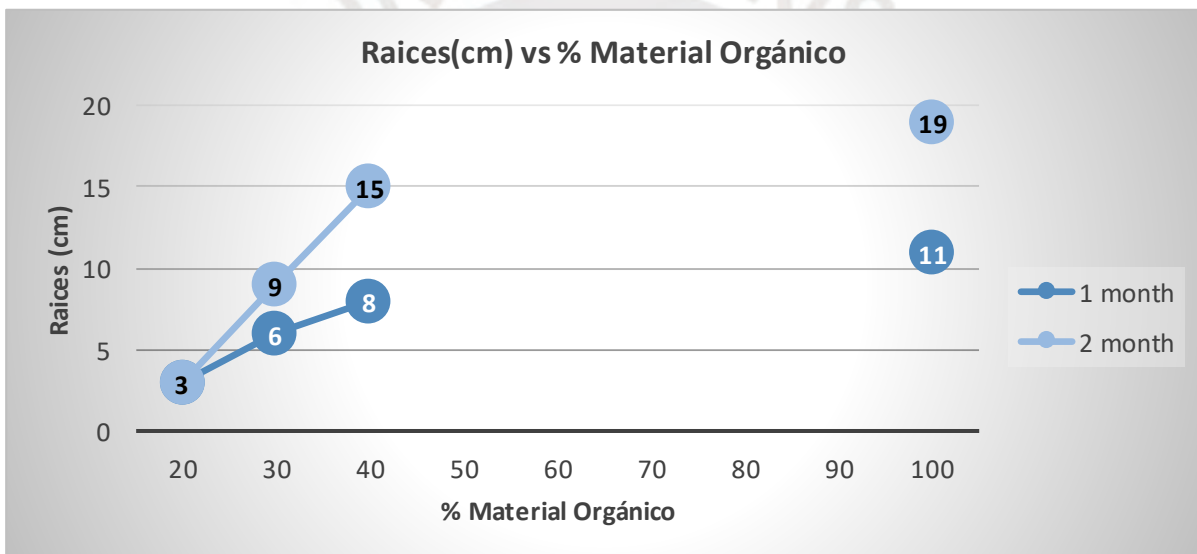
Gráficas 9: Evolución de la altura de las plantas por cada distribución, Dogo



Gráficas 10: Evolución del grosor de tallo de las plantas por cada distribución, Dogo



Gráficas 11: Evolución del radio de influencia por planta por cada distribución, Dogo



Gráficas 12: Evolución de la longitud de las raíces de las plantas por cada distribución, Dogo

Se observa un comportamiento fluctuante de valores máximos entre las muestras de los sustratos de 70-30% y 60-40%. Esto nos identifica que el Dogo no tiene problemas para su supervivencia en el sustrato con distribución 70-30%, punto a favor para reducir el uso de material orgánico.

A diferencia del Cosmos claro esto, el Dogo tiene respuesta positiva a condiciones más ácidas y en la práctica además no requería de mayor cantidad de agua. El cosmos solicitó un aumento de la ración diaria de agua para poder mantenerse vivo en la distribución 60-40%, esta evolución se observó en la Tabla 31, esto es importante porque este es un estudio de laboratorio, llevarlo a una escala real implica aumentar las condiciones observantes de

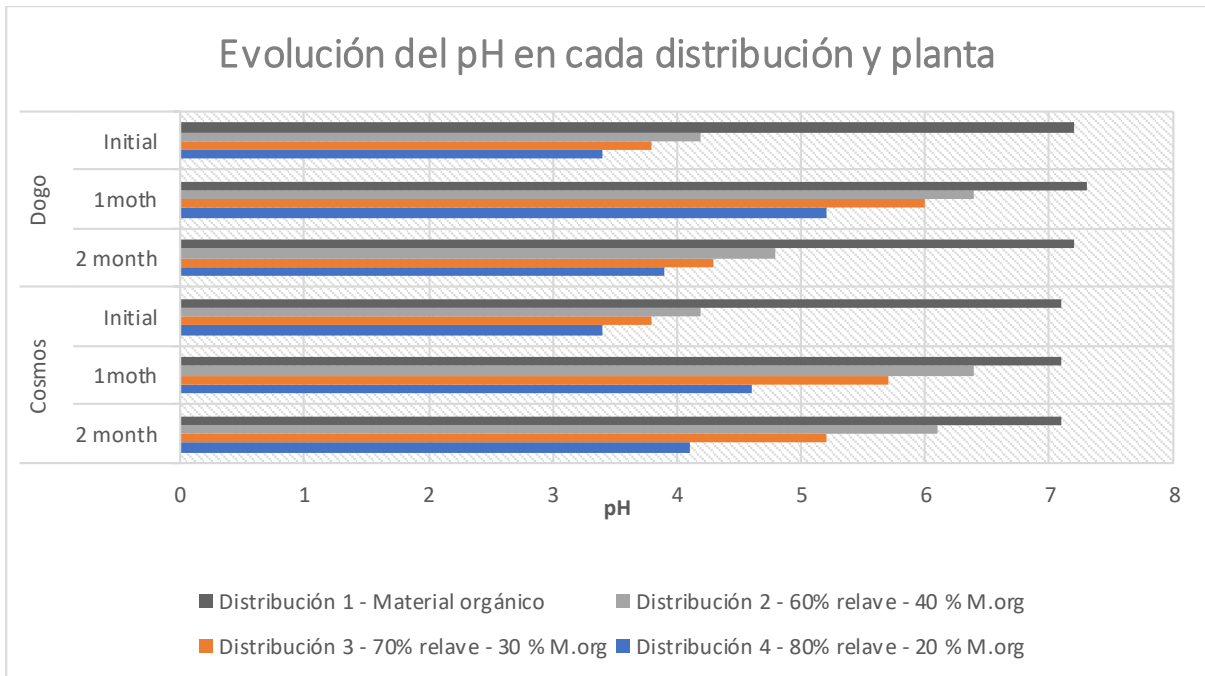
laboratorio, en ese punto el acceso a recurso hídrico en un relave es un factor clave para no solo los costos sino la responsabilidad que implica el manejo del agua.

El pH es una variable importante en el desarrollo y viabilidad de vida de muchas especies, en ese punto el pH es importante analizarlo porque nos indica la disposición de la planta para crecer en tal medio y también que tanto varía este parámetro en una zona de relaves con la influencia de la planta.

En la Gráficas 13 se observa que el pH, en todos los casos con presencia de relave, tiene una mejora significativa al primer mes de experimentación. Este punto es clave por que identifica la liberación del material orgánico, o la lectura del pH metro enfocada en la respuesta del material orgánico. En cambio, en el segundo mes se evidencia el comportamiento de ya un sustrato con materiales de relave disueltos y con influencia de la fitorremediación con un aumento del pH.

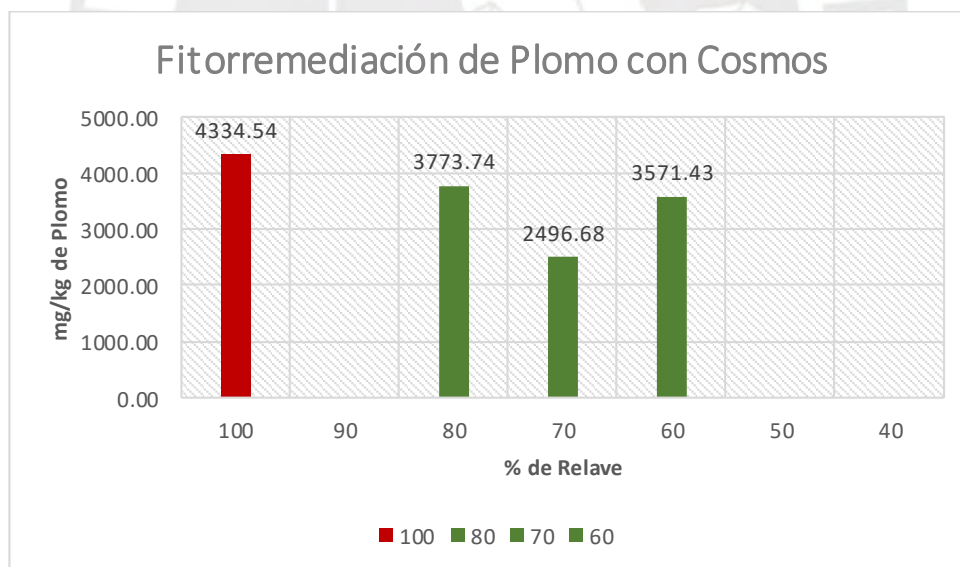
Comparando los resultados del pH del medio, se puede observar que el Cosmos ah tenido mejores resultados, en las tres muestras. Esto se debe principalmente a un factor: en las muestras de cosmos aún es visible el material orgánico que no se mezcla totalmente con el relave, a diferencia de las plantas de Dogo, donde se observa un comportamiento más homogéneo y combinado, entonces cuando se realiza la medición el pH metro, este detecta la solución de material orgánico con mayor fuerza al igual que el primer mes. Se evidencia que la capacidad de mezcla y asentamiento del sustrato está ligado a la cantidad de plantas y a la planta en cuestión, en otras palabras, el Dogo ha demostrado tener una influencia en el comportamiento físico de las partículas del sustrato acelerando su estabilidad homogénea.

Si bien el experimento no lo contabiliza debido a que el límite de estudio es al día 60 para el presente informe, los pH de las muestras de Cosmos disminuyeron abruptamente para una medición extra en el día 75, este resultado demostraba que el aumento de pH no se debía a un tratamiento del suelo sino a que los materiales del sustrato; relave y mineral, aún se encontraban muy disgregados y la lectura del pH favorecía valores altos en el día 60 para el caso del cosmos. Entonces si analizamos a fondo, no es que el Cosmos sea más eficiente aumentando el pH del medio y reduciendo su acidez, sino más bien que el Dogo presentaba mejores condiciones de tratamiento y velocidad de efecto en el sustrato.

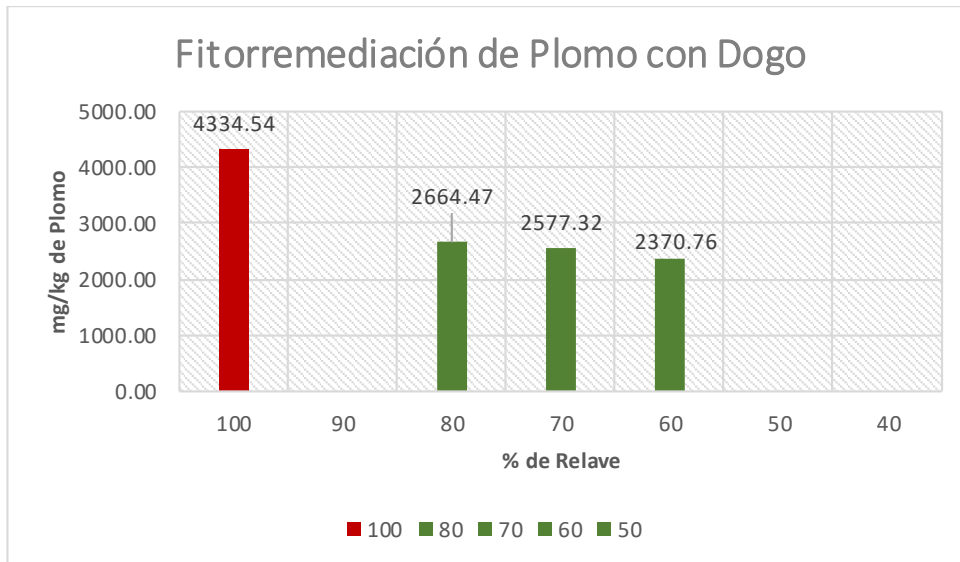


Gráficas 13: Evolución del pH, matriz comparativa entre distribución por meses y plantas

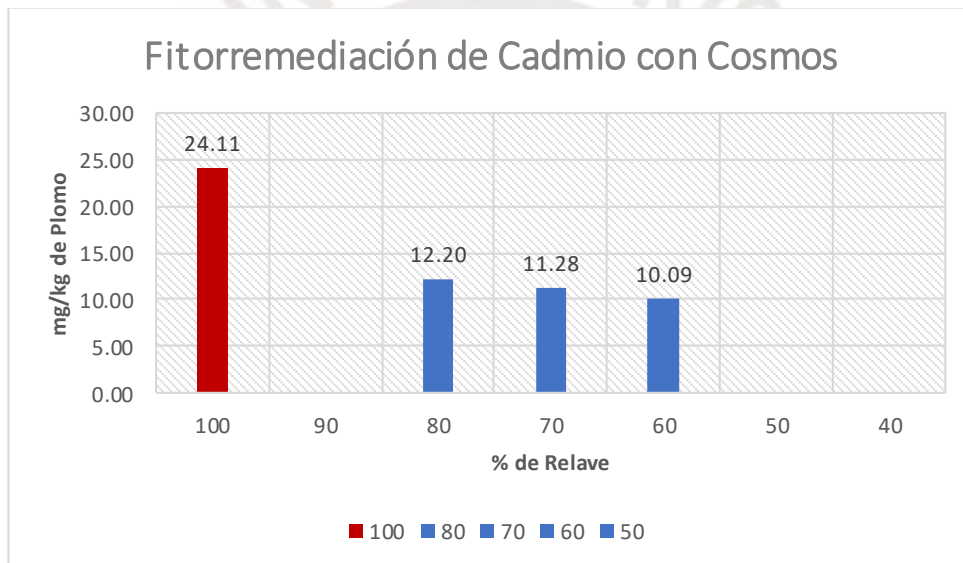
A continuación, se muestran las gráficas referentes al contenido de metales pesados de plomo y cadmio en mg/kg en las distribuciones trabajadas para relave y material orgánico.



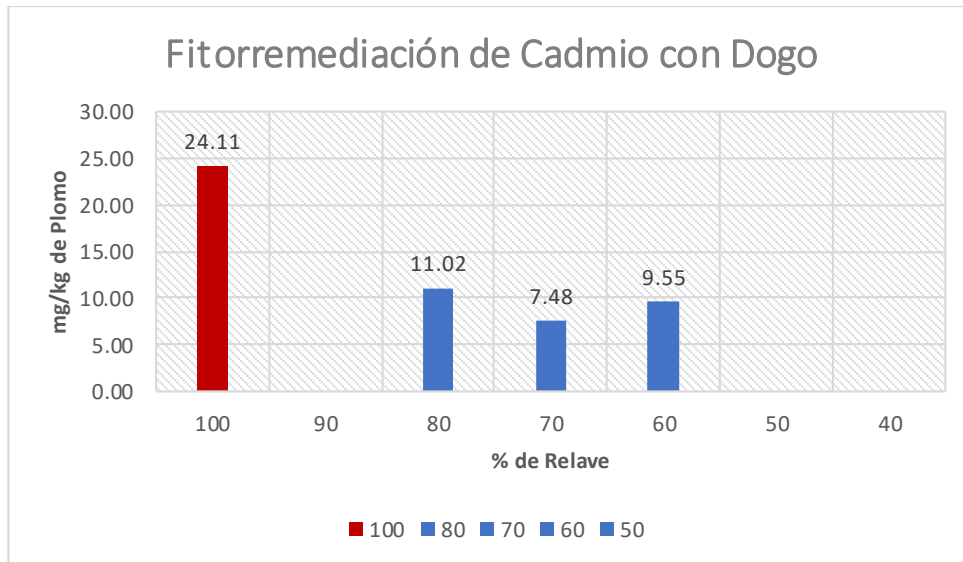
Gráficas 14: Presencia de metales pesados-Plomo, comparativa inicial-final fitorremediación, Cosmos



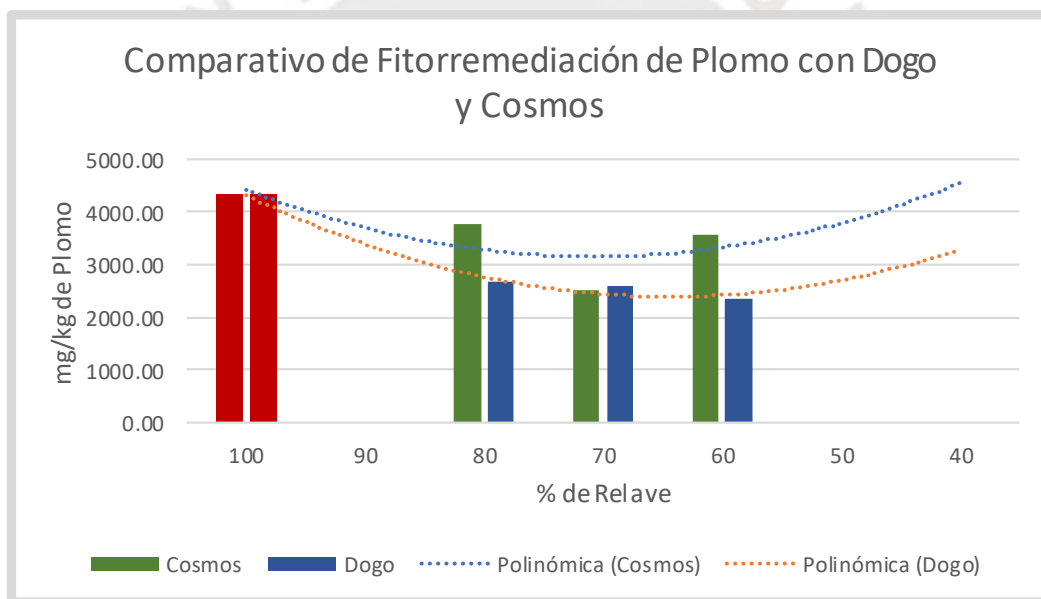
Gráficas 15: Presencia de metales pesados-Plomo, comparativa inicial-final fitorremediación, Dogo



Gráficas 16: Presencia de metales pesados-Cadmio, comparativa inicial-final fitorremediación, Cosmos

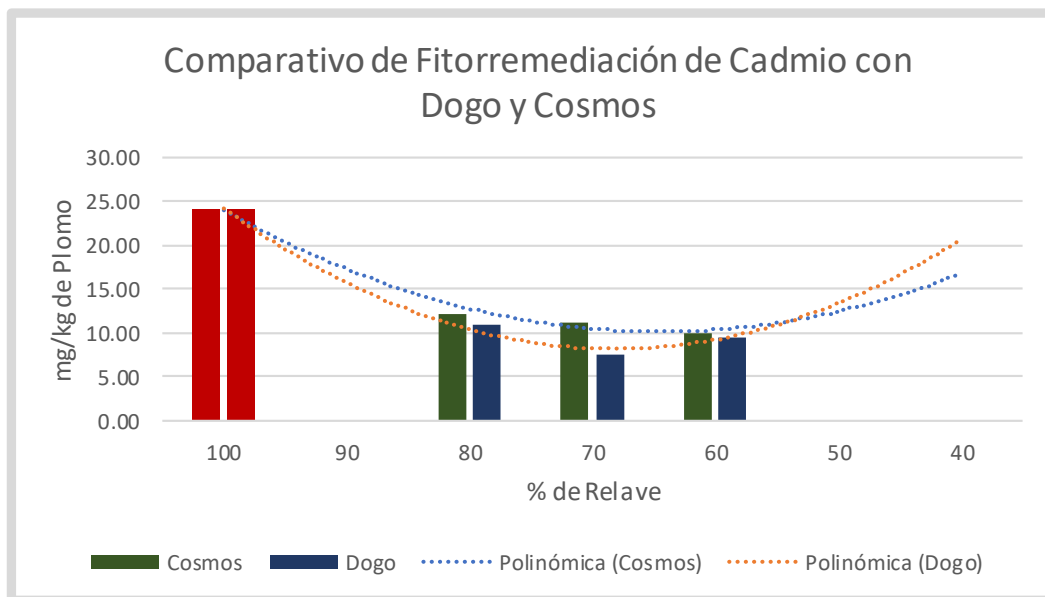


Gráficas 17: Presencia de metales pesados-Cadmio, comparativa inicial-final fitorremediación, Dogo



Gráficas 18: Tendencia de comportamiento, comparativa Dogo y Cosmos para remediación de Plomo

Se puede observar que, para el caso de la fitorremediación de plomo, el cosmos en las distribuciones en general es menos eficiente respecto al dogo. Además, desde el punto de vista de mayor reducción de plomo la distribución óptima para el cosmos sería la 70% relave – 30% material orgánico (pasando de 4334.54 mg/kg a 2496.68 mg/kg), mientras que para el caso del dogo la distribución óptima sería la de 60% relave – 40% material orgánico (pasando de 4334.54 mg/kg a 2370.76 mg/kg).



Gráficas 19: Tendencia de comportamiento, comparativa Dogo y Cosmos para remediación de Cadmio

Se puede observar que, para el caso de la fitorremediación de cadmio, el cosmos en las distribuciones en general es menos eficiente respecto al dogo. Además, desde el punto de vista de mayor reducción de plomo la distribución óptima para el cosmos sería la 60% relave – 40% material orgánico (pasando de 24.11 mg/kg a 10.09 mg/kg), mientras que para el caso del dogo la distribución óptima sería la de 70% relave – 30% material orgánico (pasando de 24.11 mg/kg a 7.48 mg/kg).

6. CONCLUSIONES

Experimento de selección

En condiciones similares de clima, altitud, riego, cantidad de material mineralógico (70%) y orgánico (30%) se realizó el experimento de selección.

Las plantas analizadas fueron: Girasol-Clavel chino - Aster - Dogo - Cosmos - Cresta de Gallo y Alhelí (Flores de siembra comercial temporal de la zona).

Se hizo evidente luego de concluir el primer experimento, (calificación cualitativa de 3 diferentes muestras extraídas del área de estudio - Quebrada Corte Ladrones) que las plantas óptimas para ser consideradas como agentes fitorremediadoras fueron el Cosmos y el Dogo

Con el estudio realizado se concluye que la Muestra N° 1 es la que presenta las condiciones más desfavorables (difíciles) para el desarrollo de las plantas, por lo que esta muestra será utilizada para el experimento principal "Fitorremediación".

Experimento de Fitorremediación

Cosmos

La planta no resiste condiciones de distribución de 80% - 20% (7 días) ni 70 - 30% (17 días), terminan muriendo y por lo tanto no desarrollan el propósito de fitorremediación completa.

El cosmos logró germinar en todas las distribuciones en un rango de 4 a 8 días.

En la distribución 60% - 40%, la evolución del crecimiento se produjo en un período relativamente corto, demostrando su buen desempeño en condiciones no tan ácidas.

Las raíces proliferan en poco tiempo, pero en una gran superficie, lo que implica un mayor requerimiento de agua por parte de la planta.

Dogo

Requiere una metodología de siembra especial debido al tamaño de las semillas (muy pequeñas).

El dogo logra su germinación en todas las distribuciones consideradas. A diferencia del cosmos, logra su supervivencia en óptimas condiciones hasta el mes, y a excepción de la distribución 80-20% logran su supervivencia a los dos meses de prueba.

El dogo muestra su lento desarrollo superficial durante los primeros días después de la germinación. Por otro lado, las raíces muestran la poca profundización, pero con una gran área de influencia.

Remediación de Plomo

Como elección final se realizará la distribución 70% de relave – 30% de material orgánico del dogo, debido a que el cosmos no logra sobrevivir en las distribuciones de 80%-20% y 70%-30% y las condiciones físicas de las plantas del dogo en la distribución 70%-30% se encuentran en condiciones estables, así como desde un punto de vista económico sería más rentable trabajar con menor cantidad de material orgánico.

Remediación de Cadmio

Como elección final se realizará la distribución 70% de relave – 30% de material orgánico del dogo, debido a que el cosmos no logra sobrevivir en las distribuciones de 80%-20% y 70%-30%, además, el dogo tiene mayor reducción de cadmio respecto al cosmos y las condiciones físicas de las plantas del dogo en la distribución 70%-30% se encuentran en condiciones estables, así como desde un punto de vista económico sería más rentable trabajar con menor cantidad de material orgánico.

Elección final

Como elección final para llevar a cabo la remediación de la zona, se determinó a lo largo de todo este experimento que el dogo resulta ser la más eficiente en términos de remediación de contenido de metales pesados, así como, en términos de desarrollo y supervivencia de la planta en condiciones afectadas (metales pesados). Dentro de la elección del dogo, la distribución óptima fue la de 70% relave y 30% material orgánico como se menciona en los incisos anteriores.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar un mayor número de ensayos de laboratorio para el sustrato a trabajar (relave + material orgánico) referidos a granulometría, conductividad eléctrica y contenido de metales pesados. Se recomienda llevar un análisis cada 15 días para tener un control óptimo de las variaciones en el comportamiento del sustrato. La finalidad de esta recomendación es poder encontrar las fechas exactas para poder realizar la cosecha y que la tecnología no presente un decaimiento en eficiencia de remediación.
- Ampliar la zona de estudio y abarcar las áreas que contienen las muestras n°2 y n°3 de la “Quebrada Corte Ladrones” para así poder determinar que plantas son adecuadas para dicha zona, así como, que distribuciones son las óptimas y más rentables.
- Realizar estudios hídricos para determinar el consumo de agua óptimo que requerirán nuestras plantas para desarrollarse en condiciones favorables
- Realizar un estudio a las plantas para monitorear el estrés oxidativo que estas presentan a lo largo del proceso de fitorremediación, para así controlar como es el desarrollo de nuestros agentes remediadores.
- Analizar otros posibles metales pesados que puedan ser perjudiciales para la salud de los pobladores que se encuentra asentándose en la zona de estudio.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Astuyauri Arroyo, D. J. (2020). *Entrevista sobre historia de Minera Perubar-Corcona*.
- Barton, C. D., Marx, D. H., Adriano, D. C., Koo, B. J., Newman, L., Czapka, S. J., & Blake, J. (2005). Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste. *Environmental Geosciences*, 12(4), 251–265. <https://doi.org/10.1306/eg.06210404021>
- Burgel, M., & Pose Román, D. (2010). *Plomo: Salud y Ambiente, Experiencia en Uruguay*. 1–248. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Carpena, R. O., & Bernal, M. P. (2007). Claves de la fitorremediación : fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16(2), 1–3.
- Conde, G. (2015). Contaminación de suelos y aguas subterráneas. *Módulo: Contaminación de Los Suelos y Aguas Subterráneas, November 1982*, 163–170.
- de la Cruz Matos, O., & Sosa Senticala, N. (2016). Informe Técnico A6729 - Evaluación de peligros geológicos sector quebrada corte ladrones - INGEMMET. *Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico-INGEMMET, A6729*.
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandova, O. (2011). Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612.
- Dushenkov, V., Nanda Kumar, P. B. A., Motto, H., & Raskin, I. (1995). Rhizofiltration: The Use of Plants To Remove Heavy Metals from Aqueous Streams. *Environmental Science and Technology*, 29(5), 1239–1245. <https://doi.org/10.1021/es00005a015>
- Extocapan Molina, J. (2017). *Tendencias en los trabajos de investigación del tema de Fitorremediación*. 81. <https://dooplayer.es/161635645-Universidad-veracruzana-facultad-de-ciencias-biologicas-y-agropecuarias-campus-tuxpan.html>
- Fernández Pino, F. (2011). *Capítulo 3 : Sistema De Adsorción. 0*. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/indice.pdf>
- García, P., Esmeralda, P., Cruz, A., & Isabel, M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3), 199–205.
- Gestión-Calidad. (2016). *Explicación de Suelos Contaminados*. <http://gestion-calidad.com/suelos-contaminados>
- Google Earth, . (2019). *No Title*. <https://www.google.com/intl/es/earth/>

- Hafez, Y. I., & Awad, E.-S. (2016). Finite element modeling of radon distribution in natural soils of different geophysical regions. *Cogent Physics*, 3(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1080/23311940.2016.1254859>
- Health Canada. (2008). *Perfil toxicológico de Cadmio (Cd), Número CAS 7440-43-9. Cd*, 1–7. <http://siar.minam.gob.pe/arequipa/download/file/fid/52314>
- Herrera Flores, K. I. M. (2019). EVALUACION DE LA CONTAMINACION POR PLOMO EN SUELOS DEL CANTON SITIO DEL NIÑO MUNICIPIO DE SAN JUAN OPICO. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Ibarra Supanta, G., Tataje Herreras, A., & Vásquez Ibarra, M. (2017). *Fitorremediación de los relaves mineros de Perúbar (Unidad Minera Graciela) por medio de Girasol (Helianthus annuus)*. 13.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2017). Determinación de metales pesados totales con digestión ácida y solubles lectura directa por Espectrofotometría de absorción atómica. 2004, 16.
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Metales+en+agua+por+Absorción+Atómica..pdf/e233a63d-378c-4f83-9311-d9375043cf2a>
- Ley General del ambiente, N. 28611. (2013). LEY N° 28611 Ley General del Ambiente. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 45–45.
- Ley que regula el Cierre de Minas, L. (2009). *Ley que regula el Cierre de Minas - LEY N° 28090*. 2003–2006.
- Ministerio de Energía y Minas-Perú. (2005). *Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros. Ministerio de Minas y Energía*. 12, 42.
- Ministerio de Minería, S. (2007). Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves. *Diario Oficial*, 159–182. http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2013). Decreto Supremo Nro. 002-2013-MINAM “Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.” 2013, 491497–491500.
- Muga P., J. (2017). *Fitoextracción de cadmio en el suelo por medio del cultivo de cosmos (Cosmos bipinnatus), del distrito de Corcona, Huarochirí 2017*.
http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/21686/Muga_PJ..pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Mur, J. P. (2018). Evaluación de la aplicabilidad de especies forestales de la serranía peruana en fitorremediación de relaves mineros. *Revista ECIPeru*, 83–87.
<https://doi.org/10.33017/reveciperu2014.0013/>
- Muso Cachumba, J. J. (2012). *Determinación de la capacidad fitorremediadora de Cadmio del Camacho (Xanthosoma undipes Koch), especie vegetal nativa en el área de influencia de ep petroecuador en el distrito amazónico.*
- Ortiz, B., Sanz, J., Dorado, M., & Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. ... *Universidad de Alcalá. Dirección General de ...*, 109.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+reucperaci?n+de+suelos+contaminados#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+recuperaci?n+de+suelos+contaminados#0>
- Padmavathiamma, P. K., & Li, L. Y. (2007). Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 184(1–4), 105–126.
<https://doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5>
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15–39.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>
- Poma, P. A. (2016). *Intoxicación por plomo en humanos*. 4(1), 64–75.
- Prasad, M. N. V., & De Oliveira Freitas, H. M. (2003). Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6(3), 110–146. <https://doi.org/10.2225/vol6-issue3-fulltext-6>
- Ramelli, G. P., Taddeo, I., Herrmann, U., & Weber, P. (2009). V13 Poster location 013 Paroxysmal tonic upgaze of infancy: 5 additional cases. *European Journal of Paediatric Neurology*, 13(September), S10. [https://doi.org/10.1016/s1090-3798\(09\)70033-9](https://doi.org/10.1016/s1090-3798(09)70033-9)
- Ramírez, A. (2013). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de La Facultad de Medicina*, 63(1), 51. <https://doi.org/10.15381/anales.v63i1.1477>
- Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Departamento de Seguridad Minera*, 1–42.
- Reglamento Para El Cierre De Minas. (2005). Reglamento Para El Cierre De Minas. *Ley Nº 28090*, 1–31.
http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MedioAmbienteMinero/Regla_cierre_minas.pdf

- Reyes-navarrete, M. G., Irene, A., Peña, A., Magdalena, D., Vargas, A. G., González-valdez, L. S., & Vázquez, C. (2007). Metales Pesados : Importancia Y Analisis. *Repositorio Digital IPN*, 1–3.
- Robinson, B., & Anderson, C. (2007). *Phytoremediation in New Zealand and Australia*. 23, 455–468. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-098-0_31
- Rodríguez Eugenio, Natalia; McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. In *Organizacion de las Naciones Unidas para la alimentacion y la agricultura FAO*. <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>
- Rodríguez Rey, A., Cuéllar Luna, L., & Maldonado Cantillo, G. (2016). Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre Harmful effects of lead on human health. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 35(3), 251–271.
- Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. Annual review of plant physiology. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 643–668. <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.arplant.49.1.643>
- Sanchez Barrón, G. (2016). Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. *Facultad De Farmacia Universidad Complutense Trabajo*, 23. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA SANCHEZ BARRON.pdf>
- Servicio de Evaluación Ambiental Chile. (2020). *Guía trámite artículo 135 Reglamento del SEIA. Construcción y operación de depósitos de relaves*. 40. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2020/03/13/guia_pas_135.pdf
- Singh, O. V., & Jain, R. K. (2003). Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63(2), 128–135. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1425-1>
- Toledo Rodriguez, C. M. (2020). Analisis de Cadmio y Plomo. In *Reporte de analisis para prueba de laboratorio*.
- Valverde Vasquez, K., & Rebaza Paredes, D. (2019). “Evaluación del potencial fitorremediador de la especie Brassica juncea (Mostaza) en suelos contaminados con zinc y arsénico provenientes de relaves mi. *Tesis*, 91.