

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN CON SESUVIUM PORTULACASTRUM PARA LA
EXTRACCIÓN DE METALES PESADOS DE UN RELAVE MINERO PROVENIENTE DE UNA
OPERACIÓN MINERA Y DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS ARTIFICIALMENTE CON
METALES PESADOS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller en Ciencias con mención
en Ingeniería de Minas**

AUTOR

Francisco Eduardo Gil Hurtado

ASESORA

Dra. Maribel Giovana Guzmán Córdova

LIMA – PERÚ

2020

RESUMEN

Actualmente la preocupación por el medio ambiente, ha generado una corriente a la cual las diferentes industrias deben sumarse comprometiéndose a reducir en lo mayor posible el impacto negativo al medio ambiente. Como una industria más, la industria minera ya se ha ido sumando a esta corriente; sin embargo, la inmensa cantidad de relave producido a nivel nacional diariamente sigue siendo un tema de preocupación.

La actual legislación peruana exige unos límites en cuanto a las concentraciones de sustancias en efluentes residuales. Por otro lado, si ya se ha dado una contaminación, se exige la remediación de los daños ocasionados al ecosistema.

La presente tesis investiga al *Sesuvium Portulacastrum*, una planta que podría ser de utilidad en la remediación de suelos y agua contaminados, absorbiendo los metales pesados que se encuentren en altas concentraciones en los recursos mencionados. Por otro lado, también se investiga si la planta puede resistir condiciones muy adversas de supervivencia para ver si puede ser plantada directamente en los depósitos de relaves, donde también absorbería los metales pesados para una futura disolución o recuperación.

La fase experimental de la presente tesis sigue es proceso de desarrollo; sin embargo, se planea evaluar la extracción de metales pesados directo de tres tipos de relave de oro: flotación fino, flotación grueso y CI; y de tierra y agua contaminada artificialmente con cobre, zinc, plomo y cadmio.

Índice General

Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Justificación del Tema.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.2.1 Nacionales.....	2
1.2.2 Internacionales.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Metodología General.....	4
Capítulo 2: Marco Teórico.....	7
2.1 Relaves Mineros.....	7
2.2 Contaminación de suelos y agua por metales pesados.....	8
2.3 Legislación ambiental.....	9
2.3.1 Ley General del Ambiente – Ley N° 28611.....	9
2.3.2 DS N° 002-2008-MINAM.....	10
2.3.3 DS 002-2013-MINAM.....	12
2.3.4 DS N°010-2010-MINAM.....	13
2.3.5 DS N°003-2010-MINAM.....	14
2.4 Plantas para fitorremediación.....	14
2.4.1 Características de las plantas para fitorremediar.....	14
2.4.2 <i>Sesuvium Portulacastrum</i>	15
2.4.3 Lugar de recolección de las plantas.....	15
2.5 Toxicidad de metales pesados.....	19
2.5.1 Cobre.....	19
2.5.2 Zinc.....	19
2.5.3 Plomo.....	19
2.5.4 Cadmio.....	19
2.6 Humedal flotante de tratamiento.....	20
2.6.1 Flotabilidad.....	20
Capítulo 3: Parte Experimental.....	22
3.1 Diseño del Experimento.....	22
3.1.1 Diseño de las celdas.....	22

3.1.2 Instalación de tubos de aireación	22
3.1.3 Impermeabilización y colocación de las capas filtrantes	22
3.1.4 Vegetación	23
3.2 Condiciones experimentales del lugar de trabajo	23
3.3 Diseño experimental	23
3.3.1 Parámetros a analizar	25
3.3.2 Metodología de recolección de muestras	26
3.4 Presentación de resultados	28
3.4.1 Parámetros físico-químicos:	28
3.4.2 Metales pesados	32
Capítulo 4: Discusión de Resultados	37
4.1 Parámetros físico-químicos	37
4.2 Metales pesados	39
4.2.1 Cobre	39
4.2.2 Zinc	39
4.2.3 Plomo	39
4.2.4 Cadmio	39
Capítulo 5: Evaluación económica de implementación de un humedal de tratamiento flotante	41
5.1 Presupuesto a escala de laboratorio	41
5.2 Valorización económica a escala real	41
Capítulo 6: Conclusiones	44
Capítulo 7: Recomendaciones	46
Bibliografía	47

Abreviaturas

S. Portulacastrum: Sesuvium Portulacastrum

Cr: Cromo

Cd: Cadmio

Cu: Cobre

Zn: Zinc

EDTA: Ácido etilendiaminotetraacético

ECA: Estándar de calidad ambiental

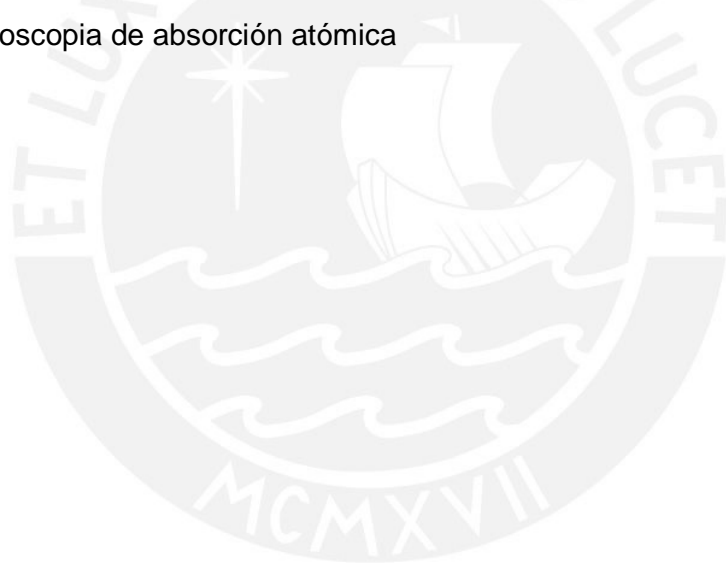
LMP: Límite máximos permisibles

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería

MINAM: Ministerio Del Ambiente

FTW: Floating Treatment Wetland

AAS: Espectroscopia de absorción atómica



Índice de Figuras

Figura 1 Contaminantes que afectan el suelo y agua subterránea en Europa 2011 ((EEA), 2015).....	1
Figura 2 Celdas en óptimas condiciones	4
Figura 3 Medición del pH directamente en el recipiente.....	6
Figura 4 Plantas extraídas después del último día de muestreo.....	7
Figura 5 Mapa delimitado del Humedal Costero de Puerto Viejo (SERFOR, 2018)	16
Figura 6 S. Portulacastrum en su hábitat natural en Puerto Viejo cercana al lago – Fuente propia	16
Figura 7 S. Portulacastrum en su hábitat natural en Puerto Viejo en arena - Fuente propia	17
Figura 8 Distribución de las cuatro celdas con las plantas – Fuente propia	22
Figura 9 Plantas antes de sembrarlas en las celdas	23
Figura 10 Disolución de los reactivos con un agitador electromagnético	27
Figura 11 Gráfica de resultados de pH de las subceldas	29
Figura 12 Gráfica de resultados de OD de las subceldas.....	30
Figura 13 Gráfica de resultados de turbidez de las subceldas.....	31
Figura 14 Gráfica de resultados de conductividad de las subceldas	32
Figura 15 Gráfica de concentraciones de Cu obtenidas.....	33
Figura 16 Gráfica de concentraciones de Zn obtenidas.....	34
Figura 17 Gráfica de concentraciones de Pb obtenidas.....	35
Figura 18 Gráfica de concentraciones de Cd obtenidas.....	36
Figura 19 Diseño de balsa para FTW	42
Figura 20 Malla de distribución de las balsas (Google Maps).....	43

Índice de Tablas

Tabla 1 ECA para Agua Físicoquímicos e Inorgánicos (Minam, 2008)	11
Tabla 2 ECA para Agua Físicoquímicos e Inorgánicos (Minam, 2008)	12
Tabla 3 ECA para el suelo (El Peruano, 2013)	13
Tabla 4 LMP descarga de efluentes de actividades minero-metalúrgicas(El Peruano, 2010)	13
Tabla 5 LMP para efluentes de Plantas de Tratamiento (El Peruano, 2013)	14
Tabla 6 Riqueza de Especies presente en el Humedal Costero de Puerto Viejo (SERFOR, 2018)	18
Tabla 7 Condiciones del Experimento	23
Tabla 8 Capacidades de los recipientes usados	24
Tabla 9 Contenido de metales en tierra contaminada	24
Tabla 10 Contenido de metales en celdas de agua contaminada	24
Tabla 11 Contenido de reactivos en tierra contaminada	25
Tabla 12 Contenido de reactivos en celdas de agua contaminada	25
Tabla 13 Parámetros físicos-químicos a analizar	25
Tabla 14 Resultados del pH de las aguas contaminadas por subcelda	29
Tabla 15 Resultados del OD de las subceldas	30
Tabla 16 Resultados de NTU de las subceldas	30
Tabla 17 Resultados de NTU de las subceldas	31
Tabla 18 Concentraciones de Cu determinadas	32
Tabla 19 Porcentajes de reducción del Cu	33
Tabla 20 Concentraciones de Zn determinadas	33
Tabla 21 Porcentajes de Reducción del Zn	34
Tabla 22 Concentraciones de Pb determinadas	34
Tabla 23 Concentraciones de Cd determinadas	35
Tabla 24 Porcentaje de reducción del Cd	36
Tabla 25 Presupuesto a escala de laboratorio	41
Tabla 26 Presupuesto a Escala Real	42

Capítulo 1: Introducción

Los avances globales han creado muchos problemas en proteger y preservar el medio ambiente (Rostami & Azhdarpoor, 2019). Esto se debe a que al inicio de la revolución industrial no se conocían los futuros problemas que generarían los residuos de las diferentes actividades industriales que desarrollarían a lo largo de la historia restante. En el caso de la industria minera peruana se conoce que desde la época de los Incas se explotaban el oro y la plata, pues estos metales se ven reflejados en su orfebrería legada. Sin embargo, es a partir de mediados de 1800, cuando la introducción del vapor incrementó notablemente la capacidad de los molinos de caída libre, y por lo tanto, la producción de desechos (Ministerio de Energía y Minas, 2005). Estos desechos, en esas épocas, eran acumulados sobre la tierra o depositados en cuerpos de aguas, como lagos, lagunas, ríos o el mar, esto simplemente dependía de cual cuerpo se encontraba más cerca de la operación minera. Esto generó, a lo largo del tiempo, contaminación en esos suelos y cuerpo de aguas determinados, los cuales hasta el día de hoy no han sido remediados. En la **figura 1**, podemos observar que el principal contaminante del suelo y agua subterránea en Europa son los metales pesados; sin embargo, en un país minero como lo es el Perú, se podría esperar un mayor porcentaje de presencia de estos metales pesados.

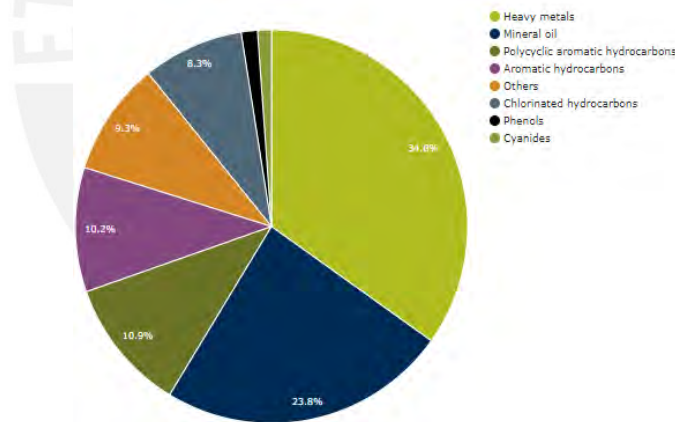


Figura 1 Contaminantes que afectan el suelo y agua subterránea en Europa 2011 ((EEA), 2015)

1.1 Justificación del Tema

El presente trabajo busca evaluar la implementación del *Sesuvium Portulacastrum*, verdolaga de playa, como un método alternativo de tratamiento de suelos y aguas contaminadas con metales pesados, y relaves, residuos generados por la industria minera, mediante la fitorremediación de ellos aprovechando las propiedades físicas y químicas de la planta en mención.

Estudios previos han comprobado la eficacia de la planta en su propiedad para remover los metales pesados en diferentes medios; por lo cual, el presente trabajo aportará evaluando estas propiedades pero con residuos directamente provocados por la industria minera.

Por otro lado, implementar un diseño de fitorremediación a largo plazo con *S.Portulacastrum* para los relaves mineros generaría un impacto positivo en las comunidades aledañas a las operaciones mineras pues haciéndolas partícipes de esta implementación no solo se logra una mayor cercanía con ellas, sino que ellas mismas serían testigos de la preocupación ambiental de las empresas mineras y sus esfuerzos por reducir su impacto negativo.

Al ser una investigación a escala de laboratorio, sería de gran aporte teórico la implementación directa en una operación minera a condiciones y ambientes propias de ella, además de un estudio para considerar la posibilidad de recuperar los metales pesados extraídos por la planta.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Nacionales

En los antecedentes nacionales de la presente investigación, solamente se encontró la tesis de William Vásquez Tenorio, donde enfoca la fitorremediación con *Sesuvium portulacastrum* para la reducción de las concentraciones salinas del suelo en San Juan La Punta, Tumán. En esa tesis se pudo comprobar que con la aplicación de *Sesuvium Portulacastrum* hubo disminución mínima de salinidad durante 3 meses de haber trasplantado la planta halófila, concluyéndose que existe resultados favorables pero no tan significativa en la parcela objeto de estudio del suelo salino en relación a los límites máximos permisibles, considerados en el trabajo de investigación (Vásquez Tenorio, 2015).

1.2.2 Internacionales

En los antecedentes internacionales de la presente investigación, se han encontrado varios artículos académicos. Uno de los principales es el artículo donde se estudió la fitoextracción de los metales pesados (Cr, Cd, Cu y Zn) de suelo contaminado artificialmente con aguas residuales provenientes de una curtiembre con *Sesuvium Portulacastrum*. En ella se concluyó que el halófilo de marisma salobre está mejor adaptada para hacerle frente a la bioacumulación de metales pesados. Además, que la planta es un candidato prometedor para remover los metales pesados directamente de los suelos contaminados con las aguas residuales de curtiembre (Ayyappan, Sathiyaraj, & Ravindran, 2016).

Otro artículo titulado “Fitorremediación, mejorada con EDTA, de suelos contaminados de plomo con *Sesuvium Portulacastrum*”. En él se investigó la tolerancia de la planta a suelos contaminados con diferentes concentraciones de plomo (200, 400 y 800 ppm) con y sin presencia de EDTA. Se concluyó que *Sesuvium Portulacastrum* era una especie prometedora para descontaminar suelos contaminados con Pb^{2+} y que su potencial de fitoextracción fue mejorado significativamente con la adición de EDTA, ácido etilendiaminotetraacético (Zaier et al., 2014).

Finalmente, hay un artículo donde se estudió la tolerancia y bioacumulación de cobre, zinc y cadmio combinado en cinco diferentes concentraciones de cada uno (1, 2.5, 5, 10 y 20 ppm) con *Sesuvium Portulacastrum*. En este artículo se concluyó que la planta puede tolerar la presencia de los metales mencionados y que su crecimiento y características fisiológicas no fueron impactados adversamente hasta que las concentraciones de los metales pesados excedían 5 mg/L (Feng et al., 2018).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la fitorremediación de metales pesados y pH de los relaves mineros con *Sesuvium Portulacastrum*.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la disminución de las concentraciones de los metales pesados en los relaves mineros.
- Evaluar la reducción del pH en los relaves mineros.
- Proponer un diseño para la fitorremediación de relaves mineros con *Sesuvium Portulacastrum*.
- Estimar los costos de implementación de la fitorremediación con *Sesuvium Portulacastrum* en una operación minera.

1.4 Hipótesis

El halófilo de marisma, *Sesuvium Portulacastrum*, bajo un rango de condiciones ambientales permitidas por la propia fisiología de la planta, disminuye las concentraciones de metales pesados (cobre, zinc, plomo, cadmio y cromo) y pH de relave provenientes de la industria minera en determinada proporción y en un tiempo determinado.

1.5 Metodología General

El primer paso sería la construcción de las celdas del experimento. Para este paso, es necesario basarse en el diseño de las celdas que se presentan en la **figura 2** y los materiales que se mencionan en la **tabla 25**. Construidas las celdas se deben seguir unos pasos preliminares:

- Para comprobar que no hay fugas de agua por las uniones de los materiales de construcción de la celda, se deben llenar de agua ambas subceldas hasta que se ocupe $\frac{3}{4}$ del volumen total, evitando derramar agua afuera de la celda.
- Para comprobar que no hubiera contaminación cruzada, una de las subceldas debe teñirse de un color visible (en esta investigación se usó tinte rojo), mientras que la otra subcelda debe quedar con agua sin ningún aditivo.
- Dejar las celdas llenas de agua por un día y verificar la condición de estas. Si es que no hay fugas, no habrá charcos de agua alrededor de la celda, y si no hay contaminación cruzada, la subcelda sin aditivo seguirá manteniéndose transparente, sin ningún rastro del agua de la subcelda contigua.



Figura 2 Celdas en óptimas condiciones

Después de comprobar esto, se debe proceder a conseguir recipientes de plástico de aproximadamente 50 ml o más, de acuerdo a los días de toma de muestra y cantidad de subceldas se pueden rotular antes de empezar a muestrear. Para este muestreo se deberán seguir los siguientes pasos:

- Identificar correctamente las celdas a muestrear para que coincidan con los recipientes de plástico rotulados. Se puede dejar cada recipiente cerca de su respectiva subcelda para evitar confusiones.
- Colocarse guantes impermeables de seguridad para evitar cualquier reacción química en las manos al momento de tomar la muestra sumergiendo el recipiente plástico en el medio de la subcelda; lentes de seguridad también son necesarios para evitar que si el agua llega a salpicar, no dañe nuestros ojos.

- El recipiente debe entrar al agua verticalmente inverso, para que la muestra no solo sea del agua superficial, sino de una columna vertical de agua de la subcelda.
- Extraído el recipiente se debe cerrar inmediatamente para evitar el ingreso de algún contaminante.

Con las muestras del día obtenidas se procede a ir al laboratorio para realizar los ensayos para obtener los parámetros a investigar. Es importante que los equipos sean correctamente calibrados según las recomendaciones de sus guías, pues estas calibraciones pueden ser mensuales, semanales o incluso diarias. Con los equipos calibrados, se debe crear un circuito interno donde las muestras puedan pasar sin ninguna complicación por todos los equipos a usar. El circuito de la presente investigación fue:

- Primero, medir el pH directamente de los recipientes de plástico con un ph-metro, limpiando con agua destilada la membrana de cristal sensible al pH cada vez que se cambiara de muestra a analizar.
- Segundo, medir la conductividad directamente de los recipientes de plástico con un conductímetro, limpiando con agua destilada el sensor cada vez que cambiara de muestra a analizar.
- Tercero, colocar el recipiente de plástico dentro de un vaso precipitado de 500 ml, pues al momento de medir con el oxímetro, su sensor era más grande que la altura del recipiente de plástico, por lo que iba a haber pérdidas por desembalse. De igual forma, limpiar con agua destilada el sensor cada vez que se cambiara de muestra a analizar.
- Cuarto, extraer 10 ml de agua contaminada del recipiente de plástico que será depositado en el recipiente adecuado provisto por el turbidímetro para su análisis.



Figura 3 Medición del pH directamente en el recipiente

Finalizado estos análisis, se procede a filtrar el agua contaminada de todas las muestras con papel filtro rápido dentro de un embudo y que deposite el agua filtrada en un matraz Erlenmeyer, para su posterior análisis por AAS, el cual se recomienda que sea al final de obtenido todas las muestras. Este filtrado se da porque el agua debe presentarse sin contaminantes para este ensayo, el cual tiene los siguientes pasos:

- Organizar las muestras a analizar según los metales que se quieran analizar.
- Colocar las lámparas adecuadas y reactivos necesarios en el equipo AAS según el metal a querer determinar su concentración.
- Ir pasando muestra por muestra por el equipo mientras se van generando las curvas de calibración en el ordenador.

De esta forma, se obtendrán todos los parámetros necesarios requeridos para la presente investigación. Después, solo queda organizar la data en tablas, gráficos y proceder a su interpretación.

Sin embargo, la presente investigación buscaba averiguar dónde es que la especie vegetal *S. Portulacastrum* almacenaba la mayor concentración de los metales pesados, es decir, en sus raíces, tallo u hojas. Para esto se planeaba usar dos tipos de digestión, seca y húmeda, descritas en (Soylak, Tuzen, Narin, & Sari, 2004) por lo que el último día del muestreo del agua contaminada se retiró las plantas para dividir las partes mencionadas, desafortunadamente, el acceso al laboratorio de medio ambiente de la PUCP

fue restringido por el surgimiento de la pandemia, así que esos resultados se encuentran en stand-by.



Figura 4 Plantas extraídas después del último día de muestreo

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Relaves Mineros

Existen varias definiciones de relaves mineros, las cuales se detallan a continuación:

- Es un sólido finamente molido, que se descarta en operaciones mineras. En la minería de sulfuros de cobre se extrae grandes cantidades de material del yacimiento explotado; sin embargo, solo el 1% es de interés económico y es finamente molido y concentrado por procesos de flotación, se obtiene un concentrado de alta ley y un material muy pobre en ley, el cual es el relave mencionado, y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019).
- Es un subproducto común del proceso de recuperación del mineral. Usualmente toman la forma de un líquido lodoso compuesto de partículas finas de minerales, que se crean cuando el mineral minado es chancado, molido y procesado, y agua (ICMM, 2019).
- Es el material residual que se queda después que los componentes valiosos han sido removido a través de procesos. Incluyen roca molida o arena, y los reactivos químicos y el agua usados para extraer la mercancía (Roche, Thygesen, & Baker, 2017).

Algunos de los problemas relacionados con la presencia de relaves mineros son por:

- Su toxicidad, aunque en principio el relave no es un residuo tóxico; sin embargo, esta puede aparecer en estados posteriores al reaccionar con agua y solubilizan tóxicos que se pueden transportar disueltos en agua. Para aquellos relave que contienen elementos

que pueden ser considerados tóxicos para el ser humano, como arsénico, cianuro, cobre, zinc, cromo, etc; las empresas mineras deben resguardar que dichas reacciones de solubilización no ocurran, protegiendo la salud humana y ambiental (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019).

- Ingesta directa por los niños, de partículas llevadas por el viento, tales como el plomo (Ministerio de Energía y Minas, 2005).
- Generación de ácido y metales (ARD) acompañantes en solución debido a la oxidación de los minerales sulfurados que pueden estar contenido en los relaves, desmontes de roca y superficies expuestas a la mina (Ministerio de Energía y Minas, 2005).

Como lo menciona el SERNAGEOMIN, las empresas mineras para evitar esas reacciones y proteger el ambiente y salud humana construyen depósitos de relaves. Estos depósitos se definen como una obra de ingeniería diseñada para satisfacer exigencias legales nacionales, de modo que se aisle completamente los sólidos (relaves) depositados del ecosistema circundante (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2019). Además, después de 1990 hubo un creciente reconocimiento de que los depósitos de relaves, aún aquellos físicamente estables, no pueden ser abandonados sin considerar sus efectos de largo plazo sobre el ambiente, la salud y la seguridad (Ministerio de Energía y Minas, 2005)

2.2 Contaminación de suelos y agua por metales pesados

Los metales pesados son aquellos elementos metálicos que tienen un peso atómico mayor al de hierro, 55.85 g/mol, excluyendo a otros metales como el vanadio, manganeso, cromo, sodio, hierro y aluminio que también son contaminantes (Galán Huertos & Romero Baena, 2008).

El suelo puede ser definido como la capa superior de la corteza de la Tierra transformada por erosión y procesos físicos, químicos y biológicos; y está compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos organizados en horizontes (Wörterbuch, 2015). La contaminación de los suelos suele referirse a la adición de productos químicos o materiales, al suelo, que tienen un efecto adverso significativo sobre cualquier organismo o en las funciones del suelo, por estar presentes en concentraciones más altas que las normales (Montanarella, Pennock, & Mckenzie, 2016).

Entonces, se concluye que la contaminación de suelos por metales pesados, es uno de los más serios y potenciales amenazas en residuos minerales, pues tiende a dificultar procesos de reformación de suelo y crecimiento de plantas, y eventualmente amenazar todo el ecosistema mediante la cadena alimenticia (Li, Wang, Chen, Yang, & Cui, 2019).

El agua es un recurso indispensable para la vida que constituye una necesidad primordial para la salud y que se ha convertido en un bien preciado debido a su escasez a nivel global (Girbau Garcia, 2002). Esta escasez se está provocando a través de los años debido a la

contaminación artificial de los cuerpos de agua debido a siete fuentes importantes, que son: aguas residuales domésticas, industrialización, crecimiento poblacional, pesticidas y fertilizantes, bolsas plásticas y de polietileno, urbanización y pobre sistema de gestión (Koshal, 1976). Es en la fuente de industrialización, donde los residuos provocados por la industria minera y sus concentraciones de metales pesados, causan daños a los seres vivos, disminuyen los rendimientos agrícolas y corroen los equipos que se usan para trabajar con el agua (Girbau Garcia, 2002).

Entonces, tanto como el agua y como el suelo se ven afectados por la minería y sus residuos, provocando a largo plazo problemas directamente en los ecosistemas cercanos a las operaciones mineras, e indirectamente a ecosistemas más alejados que gracias a los ciclos naturales existentes, como lluvias, migraciones de animales, etc., tienden a recibir esta contaminación también.

2.3 Legislación ambiental

2.3.1 Ley General del Ambiente – Ley N° 28611

De la mencionada ley, se pueden extraer las siguientes definiciones:

- ECA: 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. (MINAM, 2005)
- LMP: medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos. (MINAM, 2005)

Además de los siguientes artículos donde se obliga a los responsables a tener planes de tratamiento de pasivos ambientales, como son la presencia de los depósitos de relaves, y de las aguas residuales:

- Art. 30.1: Los planes de descontaminación y de tratamiento de pasivos ambientales están dirigidos a remediar impactos ambientales originados por uno o varios proyectos de inversión o actividades, pasados o presentes. El Plan debe considerar su financiamiento y las responsabilidades que correspondan a los titulares de las

actividades contaminantes, incluyendo la compensación por los daños generados, bajo el principio de responsabilidad ambiental (MINAM, 2005).

- Art 122.3: Las empresas o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con lo establecido en las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales o servidas de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador, a través de terceros debidamente autorizados a o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia (MINAM, 2005).

2.3.2 DS N° 002-2008-MINAM

De este documento se pueden extraer los ECA para el agua. Hay varias categorías que definen los límites de los valores de los diferentes parámetros según el uso que se le vaya a dar al agua:

- Categoría 1: poblacional y recreacional
- Categoría 2: actividades marino costeras
- Categoría 3: riego de vegetales y bebidas de animales
- Categoría 4: conservación del ambiente acuático

La categoría que se usará es la 3, pues es la mínima que se espera que terminen los cuerpos de agua que se vean afectados por una operación minera, para así no alterar la flora y fauna de esa zona, y por ende, al ecosistema.

Tabla 1 ECA para Agua Fisicoquímicos e Inorgánicos (Minam, 2008)

Parámetros para riego de vegetales de tallo bajo y tallo alto		
Parámetros	Unidad	Valor
Fisioquímicos		
Bicarbonatos	mg/L	370
Calcio	mg/L	200
Carbonatos	mg/L	5
Cloruros	mg/L	100-700
Conductividad	(uS/cm)	<2000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Fluoruros	mg/L	1
Fosfatos - P	mg/L	1
Nitratos (NO ₃ -N)	mg/L	10
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	0.06
Oxígeno Disuelto	mg/L	>=4
pH	Unidad de pH	6.5-8.5
Sodio	mg/L	200
Sulfatos	mg/L	300
Sulfuros	mg/L	0.05
Inorgánicos		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0.05
Bario total	mg/L	0.7
Boro	mg/L	0.5-6
Cadmio	mg/L	0.005
Cianuro Wad	mg/L	0.1
Cobalto	mg/L	0.05
Cobre	mg/L	0.2
Cromo (6+)	mg/L	0.1
Hierro	mg/L	1
Litio	mg/L	2.5
Magnesio	mg/L	150
Manganeso	mg/L	0.2
Mercurio	mg/L	0.001
Níquel	mg/L	0.2
Plata	mg/L	0.05
Plomo	mg/L	0.05
Selenio	mg/L	0.05
Zinc	mg/L	2

Tabla 2 ECA para Agua Fisicoquímicos e Inorgánicos (Minam, 2008)

Parámetros para bebida de animales		
Parámetros	Unidad	Valor
Fisioquímicos		
Conductividad Eléctrica	(uS/cm)	<=5000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	<=15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Fluoruros	mg/L	2
Nitratos (NO3-N)	mg/L	50
Nitritos (NO2-N)	mg/L	1
Oxígeno Disuelto	mg/L	>5
pH	Unidad de pH	6.5-8.4
Sulfatos	mg/L	500
Sulfuros	mg/L	0.05
Inorgánicos		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0.1
Berilio	mg/L	0.1
Boro	mg/L	5
Cadmio	mg/L	0.01
Cianuro Wad	mg/L	0.1
Cobalto	mg/L	1
Cobre	mg/L	0.5
Cromo (6+)	mg/L	1
Hierro	mg/L	1
Litio	mg/L	2.5
Magnesio	mg/L	150
Manganeso	mg/L	0.2
Mercurio	mg/L	0.001
Níquel	mg/L	0.2
Plata	mg/L	0.05
Plomo	mg/L	0.05
Selenio	mg/L	0.05
Zinc	mg/L	24

2.3.3 DS 002-2013-MINAM

De este documento se pueden extraer los ECA para el suelo. Hay tres categorías en las cuales los valores permitidos varían según el parámetro. Se elegirá la categoría según el uso que se le quiera dar al suelo.

Tabla 3 ECA para el suelo (El Peruano, 2013)

N.º	Parámetros	Usos del Suelo			Método de ensayo
		Suelo Agrícola	Suelo Residencial/Parques	Suelo Comercial/Industrial/Extractivos	
I Orgánicos					
1	Benceno (mg/kg MS)	0,03	0,03	0,03	EPA 8260-B
2	Tolueno (mg/kg MS)	0,37	0,37	0,37	EPA 8260-B
3	Etilbenceno (mg/kg MS)	0,082	0,082	0,082	EPA 8260-B
4	Xileno (mg/kg MS)	11	11	11	EPA 8260-B
5	Naftaleno (mg/kg MS)	0,1	0,6	22	EPA 8260-B
6	Fracción de hidrocarburos F1 (C5-C10) (mg/kg MS)	200	200	500	EPA 8015-B
7	Fracción de hidrocarburos F2 (C10-C28) (mg/kg MS)	1 200	1 200	5 000	EPA 8015-M
8	Fracción de hidrocarburos F3 (C28-C40) (mg/kg MS)	3 000	3 000	6 000	EPA 8015-D
9	Benzo(a) pireno (mg/kg MS)	0,1	0,7	0,7	EPA 8270-D
10	Bifenilos policlorados - PCB (mg/kg MS)	0,5	1,3	33	EPA 8270-D
11	Aldrin (mg/kg MS) ⁽¹⁾	2	4	10	EPA 8270-D
12	Endrín (mg/kg MS) ⁽¹⁾	0,01	0,01	0,01	EPA 8270-D
13	DDT (mg/kg MS) ⁽¹⁾	0,7	0,7	12	EPA 8270-D
14	Heptacloro (mg/kg MS) ⁽¹⁾	0,01	0,01	0,01	EPA 8270-D
II Inorgánicos					
15	Cianuro libre (mg/kg MS)	0,9	0,9	8	EPA 9013-A/APHA-AWWA-WEF 4500 CN F
16	Arsénico total (mg/kg MS) ⁽²⁾	50	50	140	EPA 3050-B
17	Bario total (mg/kg MS) ⁽²⁾	750	500	2 000	EPA 3050-B
18	Cadmio total (mg/kg MS) ⁽²⁾	1,4	10	22	EPA 3050-B
19	Cromo VI (mg/kg MS)	0,4	0,4	1,4	DIN 19734
20	Mercurio total (mg/kg MS) ⁽²⁾	6,6	6,6	24	EPA 7471-B
21	Plomo total (mg/kg MS) ⁽²⁾	70	140	1 200	EPA 3050-B

2.3.4 DS N°010-2010-MINAM

De este documento se pueden extraer los LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.

Tabla 4 LMP descarga de efluentes de actividades minero-metalúrgicas(El Peruano, 2010)

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH	Unidad de pH	6-9	6-9
Sólidos Totales en suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0.8
Arsénico Total	mg/L	0.1	0.08
Cadmio Total	mg/L	0.05	0.04
Cromo Hexavalente	mg/L	0.1	0.06
Cobre Total	mg/L	0.5	0.4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1.6
Plomo Total	mg/L	0.2	0.16
Mercurio Total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc Total	mg/L	1.5	1.2

2.3.5 DS N°003-2010-MINAM

De este documento se pueden extraer los LMP para la descarga de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

Tabla 5 LMP para efluentes de Plantas de Tratamiento (El Peruano, 2013)

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	10000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos totales en suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

2.4 Plantas para fitorremediación

La fitorremediación es un término que se puede definir como un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (Delgadillo-López, González-Ramírez, Prieto-García, Villagómez-Ibarra, & Acevedo-Sandova, 2011).

Hay varias técnicas de descontaminación de suelos además de la fitorremediación como la extracción por fluidos, el tratamiento químico, el tratamiento electroquímico, el tratamiento térmico o el tratamiento microbiológico, pero es la fitorremediación la técnica con los costos más bajos y que impacta positivamente en el paisaje.

2.4.1 Características de las plantas para fitorremediar

A pesar de ser una técnica muy valuada en los tiempos actuales, no todas las especies de plantas pueden usarse en esta técnica, pues tendrían que vivir a un ambiente muy difícil de sobrevivencia. Es por eso, que para seleccionar las plantas adecuadas para esta tarea, por eso en (Núñez, Vong, Ortega, & Olgún, 2004) se nos mencionan algunas características que deben tener estas plantas:

- Que sean tolerantes a altas concentraciones de metales
- Que sean acumuladoras de metales
- Que tengan una rápida tasa de crecimiento y alta productividad
- Que sean especies locales, representativas de la comunidad natural
- Que sean fácilmente cosechables

2.4.2 *Sesuvium Portulacastrum*

Es la planta en la cual nos enfocaremos en este estudio sobre fitorremediación en diferentes condiciones, comúnmente se conoce también como verdolaga de playa.

Se le puede definir como: una hierba o arbusto bajo, erguido, ramificado y succulento. Sus hojas son opuestas, pulposas y sin ninguna estípula. Sus flores son axilares, sésiles o pedúnculas, solitarias o agrupadas, y con ninguna o dos bractéolas (Gamble, 1929).

Sus propiedades descritas en la justificación de la presente tesis logran coincidir con las características necesarias descritas previamente para plantas usadas en fitorremediación; pues es tolerante a altas concentraciones de metales acumulándolas en mayor cantidad en sus raíces, además que crece rápido en las condiciones adecuadas y que por su tamaño es fácilmente cosechable.

2.4.3 Lugar de recolección de las plantas

Las plántulas de *S. Portulacastrum* fuera recolectadas del Humedal Costero de Puerto Viejo (latitud S-12°34' y longitud W-76°42'), ubicado en el distrito de San Antonio-Chilca, provincia de Cañete, departamento de Lima, como se puede apreciar en la **figura 5**.

Se recolectaron en dos tipos de ambientes presentes en el humedal, algunas en la tierra cercana al lago donde crecían en abundancia entrelazándose entre ellas y debido a eso y a la presencia de otras plantas, era difícil llegar a la tierra, por lo cual se decidió extraerlas por segmentos, como se aprecia en la **figura 6**. Por otro lado, el otro ambiente era desértico con solo presencia de arena y ninguna fuente de agua cercana. Estas se encontraban en muy pocas cantidades aisladas una de otra, sus hojas eran más pequeñas y sus tallos eran medio rojizos, y debido a la facilidad de excavar en arena, se pudieron recolectar con todo y raíz, como se aprecia en la **figura 7**. Es en la **tabla 6** que hay dos familias del *S. Portulacastrum*, lo cual confirmaría sus diferencias previamente mencionadas. Además, se enviaron ambas muestras de la planta al Museo de Historia Natural para que hagan una determinación de muestras botánicas; sin embargo, solo se entregó una constancia, pues al final se determinó, que a pesar de sus diferencias visuales, ambas muestras eran la misma planta: *S. Portulacastrum* de la familia Aizoaceae, como se aprecia en el **anexo 1**.

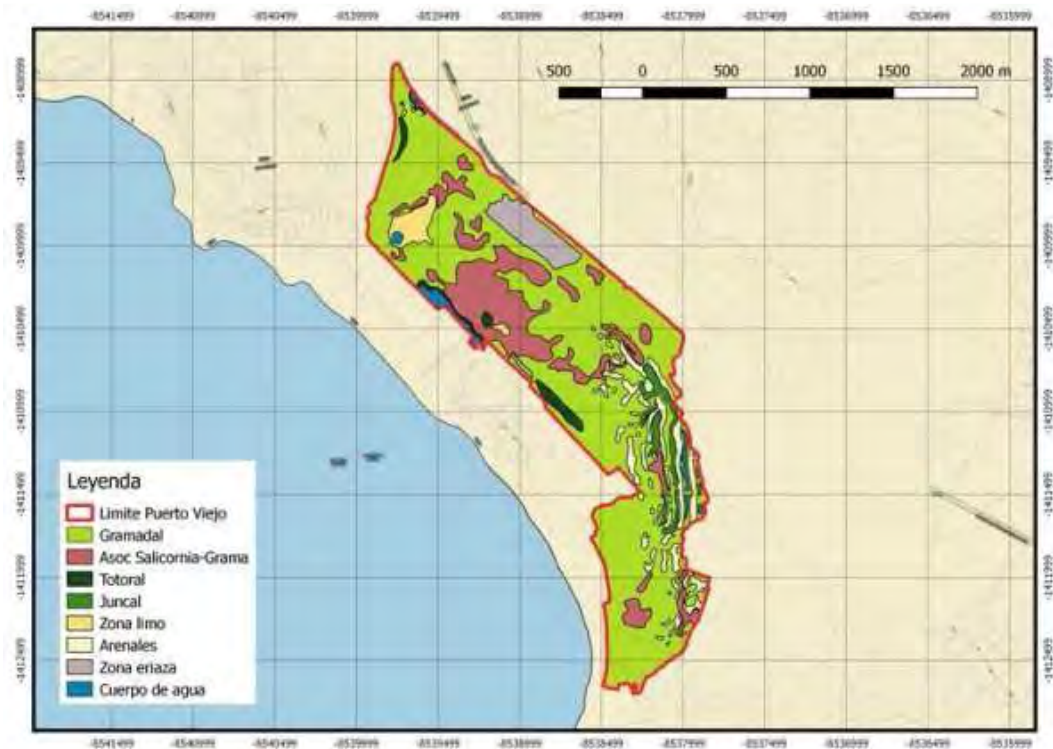


Figura 5 Mapa delimitado del Humedal Costero de Puerto Viejo (SERFOR, 2018)



Figura 6 S. Portulacastrum en su hábitat natural en Puerto Viejo cerca al lago – Fuente propia



Figura 7 S. Portulacastrum en su hábitat natural en Puerto Viejo en arena - Fuente propia



Tabla 6 Riqueza de Especies presente en el Humedal Costero de Puerto Viejo (SERFOR, 2018)

Riqueza de Especies					
Flora Silvestre del Humedal Puerto Viejo					
Nº	Familia	Especies	Nombre común	Forma	Cat. Amenaza
1	Aizoaceae	<i>Sesuvium portulacastrum</i>	Capín	Hierba	-----
2	Amaranthaceae	<i>Alternanthera halimifolia</i>			-----
3	Amaranthaceae	<i>Alternanthera pubiflora</i>			-----
4	Amaranthaceae	<i>Amaranthus hybridus</i>	Yuyo		-----
5	Amaranthaceae	<i>Chenopodium ambrosioides</i>		Hierba	-----
6	Amaranthaceae	<i>Chenopodium macrospermum</i>	Paico	Hierba	-----
7	Amaranthaceae	<i>Chenopodium murale</i>	Quinoa silvestre	Hierba	-----
8	Amaranthaceae	<i>Salicornia fruticosa</i>		Hierba	-----
9	Amaranthaceae	<i>Sarcocornia fruticosa</i>	Sarcocornia		-----
10	Amaranthaceae	<i>Sarcocornia neel</i>			-----
11	Araceae	<i>Lemna sp.</i>		Hierba	-----
12	Araliaceae	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	Sombrerito	Hierba	-----
13	Asteraceae	<i>Acmelia oleracea</i>			-----
14	Asteraceae	<i>Ambrosia peruviana</i>	Malco		-----
15	Asteraceae	<i>Baccharis salicifolia</i>	Chilco		-----
16	Asteraceae	<i>Encelia canescens</i>			-----
17	Asteraceae	<i>Enhydra sessilifolia</i>		Hierba	-----
18	Asteraceae	<i>Pluchea chingoyo</i>			-----
19	Asteraceae	<i>Sonchus oleraceus</i>			-----
20	Asteraceae	<i>Spilanthes leiocarpa</i>			-----
21	Bataceae	<i>Batis maritima</i>		Hierba	En peligro crítico (CR)
22	Boraginaceae	<i>Heliotropium curassavicum</i>	Hierba del alacrán	Hierba	-----
23	Cyperaceae	<i>Bolboschoenus maritimus</i>			-----
24	Cyperaceae	<i>Cyperus laevigatus</i>		Caña	-----
25	Cyperaceae	<i>Schoenoplectus americanus</i>	Junco	Caña	-----
26	Cyperaceae	<i>Schoenoplectus californicus</i>	Junco	Caña	-----
27	Euphorbiaceae	<i>Ricinus communis</i>	Higuerilla	Arbusto	-----
28	Fabaceae	<i>Acalemnacia macracantha</i>	Huarango	Arbusto	Casi Amenazado (NT)
29	Fabaceae	<i>Melilotus indicus</i>			-----
30	Fabaceae	<i>Prosopis pallida</i>	Algarrobo		-----
31	Haloragaceae	<i>Myriophyllum aquaticum</i>		Hierba	-----
32	Plantaginaceae	<i>Bacopa monnieri</i>	Verdolaguilla	Hierba	-----
33	Plantaginaceae	<i>Plantago major</i>	Llantén		-----
34	Poaceae	<i>Arundo donax</i>	Carrizo	Caña	-----
35	Poaceae	<i>Cynodon dactylon</i>	Gramma dulce	Hierba	-----
36	Poaceae	<i>Distichlis spicata</i>	Gramma salada	Hierba	-----
37	Poaceae	<i>Paspalidium geminatum</i>	Gramma	Hierba	-----
38	Poaceae	<i>Paspalum vaginatum</i>	Gramma	Hierba	-----
39	Poaceae	<i>Polypogon semiverticillatus</i>	Gramma		-----
40	Poaceae	<i>Polypogon viridis</i>			-----
41	Poaceae	<i>Sporobolus virginicus</i>	Gramma		-----
42	Pontederiaceae	<i>Eichhornia crassipes</i>	Jacinto de agua	Hierba	-----
43	Portulacaceae	<i>Sesuvium portulacastrum</i>			-----
44	Potamogetonaceae	<i>Potamogeton striatus</i>		Hierba	-----
45	Potamogetonaceae	<i>Zannichellia palustris</i>		Hierba	-----
46	Pteridaceae	<i>Adiantum sp.</i>		Hierba	-----
47	Salicaceae	<i>Salix chilensis</i>	Sauce	Arbusto	-----
48	Salviniaceae	<i>Azolla filiculoides</i>		Hierba	-----
49	Solanaceae	<i>Lycium americanum</i>			-----
50	Solanaceae	<i>Nolana humifusa</i>			-----
51	Solanaceae	<i>Solanum americanum</i>	Hierba mora		-----
52	Solanaceae	<i>Solanum pimpinellifolium</i>			-----
53	Tropaeolaceae	<i>Tropaeolum majus</i>	Mastuerzo		-----
54	Typhaceae	<i>Typha angustifolia</i>	Tatora	Caña	-----
55	Typhaceae	<i>Typha domingensis</i>		Caña	-----
56	Verbenaceae	<i>Lippia nodiflora</i>			-----

2.5 Toxicidad de metales pesados

2.5.1 Cobre

Principal metal que el Perú produce a nivel nacional que se obtiene de minerales sulfurosos, tal como la covelita (CuS), cuprita (Cu₂O), calcopirita (CuFeS₂), etc.

Tiene usos importantes en la industria de las comunicaciones, por ser conductor de electricidad, pues se usa para cables eléctricos; en la agricultura, pues las sales de cobre se usan como desinfectante, etc.

Sin embargo, consumir un agua con altos niveles de cobre puede provocar en seres humanos desde náusea, vómitos hasta daño en el hígado y los riñones, y finalmente, la muerte. Además, los estudios en animales sugieren que la ingestión de niveles altos de cobre puede reducir el crecimiento del feto (ATSDR, 2004).

2.5.2 Zinc

Metal también producido a nivel nacional que se obtiene principalmente de la esfalerita (ZnS), mineral de diferentes tonalidades dependiendo de las impurezas presentes.

Su principal uso es, mediante la galvanización, recubrir acero para evitar la corrosión atmosférica. Por otro lado, el óxido de zinc se usa para la fabricación de cemento dental, esmaltes y como antiséptico.

Sin embargo, consumir este metal en altas dosis, puede provocar en los hombres un riesgo significativamente mayor de cáncer avanzado de próstata, incremento en los niveles de testosterona y colesterol, además de interferencia y disminución del estatus corporal de cobre (Rubio et al., 2007).

2.5.3 Plomo

Metal que se obtiene principalmente como galena (PbS) y cerusita (PbCO₃), el primero siendo un mineral sulfuroso y el segundo, un mineral oxidado.

Se usa para la fabricación de baterías, como plomo tetraetilico que se le adiciona a algunos tipos de gasolina, además de servir como protección contra los rayos alfa y gamma. Sin embargo, el consumo de agua con altos niveles de este metal produce, en el caso de las embarazadas, un riesgo mayor de partos prematuros, abortos espontáneos y muertes fetales; en el caso de los niños, puede provocar problemas renales, hipertensión arterial y problemas de la reproducción; en general, también provoca problemas neurológicos (A Poma, 2013).

2.5.4 Cadmio

Metal que solo se obtiene principalmente de la refinación del zinc, también en menor cantidad de la refinación de plomo y concentrados de zinc y cobre.

Se usa para la creación de baterías de níquel-cadmio, en la manufacturación del PVC, recubrimiento galvanizado contra la corrosión marina, etc. Sin embargo, el consumo de agua con altos niveles de cadmio produce, desde náuseas, vómitos, dolores abdominales, cefalea hasta al choque (García, Esmeralda, Cruz, & Isabel, 2012).

2.6 Humedal flotante de tratamiento

Más conocido en su nombre en inglés “floating treatment wetlands (FTW)”. Son ecosistemas artificiales que simulan un humedal natural mediante el uso de balsas flotantes, las cuales soportaran a las plantas, cuya función será de mejorar la calidad de agua mediante filtración, consumo, o descomposición de los contaminantes, como nutrientes, sedimentos y metales, provenientes del agua (David J, 2013).

Debido a que los materiales necesarios para construir las balsas son relativamente baratos y de fácil acceso, este método de tratamiento de agua es considerado barato a comparación de otros métodos existentes. Sin embargo, su bajo costo no es la única ventaja, pues debido a su diseño flexible, puede adaptarse para ajustarse a cualquier estanque o lago; provee de un sistema sostenible de remoción de contaminantes con una buena efectividad, ofrece resiliencia pues los FTW pueden tolerar fluctuaciones de cambios de nivel de agua, y mejoran la estética paisajista (David J, 2013)

2.6.1 Flotabilidad

Hay diferentes métodos con los cuales se puede asegurar que las plantas floten o estén soportadas en la superficie del agua, algunos de estos métodos son descritos en (Headley & Tanner, 2008):

1. Una balsa flotante o marco que soporte una red o malla que soporte suelo o media, como turba de coco, en donde las plantas crecerán.
2. Un tapete artificial o matriz con flotabilidad integrada donde las plantas puedan crecer directamente.
3. Un marco rígido suspendido cerca a la superficie de agua que soporte el crecimiento de las plantas. Este sistema requiere una profundidad de agua constante que debe mantenerse, por lo cual no es ideal para aplicaciones con agua pluvial.

4. Cables suspendidos por encima de la superficie del agua que soporte contenedores de plantas donde las plantas podrán extenderse lateralmente
5. Formación de un auto-flotable tapete endógeno de raíces entrelazadas, rizomas, basura vegetal y materia orgánica, como un humedal flotante natural. La flotabilidad es mantenida naturalmente como resultado del aire contenido en los huecos o raíces esponjadas rizomas.



Capítulo 3: Parte Experimental

3.1 Diseño del Experimento

Se utilizaron cuatro celdas, con dos subceldas en cada una, de acrílico transparente y con un sistema de aireación para ayudar en la distribución uniforme de las soluciones usadas. Además, cada subcelda contiene una capa filtrante que su objetivo era permitir la adaptación del *S. Portulacastrum* como el drenaje del fluido. En cada subcelda se colocaron dos plantas de esta especie, sumando unas cuatro por celda, como se ve en la **figura 5**.



Figura 8 Distribución de las cuatro celdas con las plantas – Fuente propia

3.1.1 Diseño de las celdas

Las celdas usadas para el presente experimento fueron construidas para un trabajo previo de diseño de humedales artificiales (Pulcha & Valencia, 2019). Las dimensiones de la celda son de 20x80x40 cm, siendo ancho, largo y altura respectivamente. El uso del acrílico transparente fue para poder observar el desarrollo de raíces de las plantas.

3.1.2 Instalación de tubos de aireación

Para el sistema de aireación se colocaron dos tuberías verticales de 40cm distribuidas a 15cm de distancia de los extremos de cada subcelda, los cuales servirán como respiraderos.

3.1.3 Impermeabilización y colocación de las capas filtrantes

Las celdas contaban con material acrílico de 5mm de espesor. Además, para comprobar esta impermeabilización se llenaron las subceldas con agua con tinte rojizo para observar si había alguna filtración entre subceldas o hacia afuera de la celda. Por otro lado, se depositó 15kg de piedra chancada en el fondo de cada subcelda, la cual funcionó como una capa filtrante de 15cm. Estas piedras, el material filtrante, tenían un diámetro de 20-40 mm en promedio.

3.1.4 Vegetación

En cada subcelda se colocaron dos plantas de *S. Portulacastrum*, cada una a 15cm de los extremos de las subceldas, junto a las tuberías verticales. El ambiente al cual fueron sometidos las plantas fue uno abierto, con entrada de luz, para que prosigan con sus procesos físicos y biológicos. Antes de sembrarlos, por lo mismo que fueron extraídos de su hábitat natural mediante corte de nodos, se prefirió tenerlos solo un día sin acceso a la luz solar, para evitar su deshidratación como se observa en la **figura 6**.



Figura 9 Plantas antes de sembrarlas en las celdas

3.2 Condiciones experimentales del lugar de trabajo

El lugar de trabajo del presente experimento se realizó en la Sección de Ingeniería de Minas de la PUCP, donde durante el plazo de tiempo que se realizó el experimento, es decir, desde que se colocaron las plantas en la celda hasta que se extrajeron; se registraron las condiciones a las cuales las plantas estaban siendo sometidas. El promedio de estas condiciones se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7 Condiciones del Experimento

Condiciones Experimentales	
Temperatura	27.5 °C
Humedad Relativa	72%
Altitud	45 msnm
Presión	1012.10 mb

3.3 Diseño experimental

La evaluación de la propiedad de absorción de los metales pesados de la especie vegetal *S. Portulacastrum* se llevó a cabo en cuatro celdas, de dos subceldas en cada una de ellas, donde se colocaron dos muestras de planta en cada subcelda. Las concentraciones a usar de los metales pesados son de 4, 4, 4 y 5 ppm de Cu, Zn, Cd y Pb respectivamente. Para el cálculo de las cantidades los metales pesados se consideraron las siguientes capacidades:

Tabla 8 Capacidades de los recipientes usados

Recipiente	Capacidad	Unidad
Mediana	6.18	kg
Grande	7.62	kg
Subcelda	20	L

Según estas capacidades se buscó obtener las siguientes cantidades de metales pesados según el experimento a realizar:

Tabla 9 Contenido de metales en tierra contaminada

Contenidos de metales (mg)				
Maceta	Cu	Zn	Pb	Cd
M1	24.72			
M2		24.72		
M3			30.9	
M4				24.72
G1	30.48	30.48		
G2	30.48		38.1	
G3	30.48			30.48
G4	30.48	30.48	38.1	30.48
Total Metal (mg)	146.64	85.68	107.1	85.68

Tabla 10 Contenido de metales en celdas de agua contaminada

Contenidos de metales (mg)				
Celda	Cu	Zn	Pb	Cd
C1	80			
C2		80		
C3			100	
C4				80
C5	80	80		
C6	80		100	
C7	80			80
C8	80	80	100	80
Total Metal (mg)	400	240	300	240

Sin embargo, estos elementos no se consiguen aislados. Para conseguir estas cantidades de metales pesados, necesitamos reactivos que contengan estos reactivos, y para eso la cantidad necesaria de estos reactivos será diferente:

Tabla 11 Contenido de reactivos en tierra contaminada

Contenidos de reactivos (mg)				
Maceta	Cu	Zn	Pb	Cd
M1	97.1284943			
M2		108.712605		
M3			45.2103641	
M4				44.2726891
G1	119.760376	134.043697		
G2	119.760376		55.7448179	
G3	119.760376			54.5886555
G4	119.760376	134.043697	55.7448179	54.5886555
Reactivo	CuSO ₄ -5H ₂ O	ZnSO ₄ -7H ₂ O	PbSO ₄	CdCl ₂ -H ₂ O
Total Reactivo (mg)	576.17	376.8	156.7	153.45

Tabla 12 Contenido de reactivos en celdas de agua contaminada

Contenidos de reactivos (mg)				
Cell	Cu	Zn	Pb	Cd
C1	314.33			
C2		351.85		
C3			146.36	
C4				143.27
C5	314.33	351.85		
C6	314.33		146.36	
C7	314.33			143.27
C8	314.33	351.85	146.36	143.27
Reactivo	CuSO ₄ -5H ₂ O	ZnSO ₄ -7H ₂ O	PbSO ₄	CdCl ₂ -H ₂ O
Total Reactivo (mg)	1571.65	1055.55	439.08	429.82

3.3.1 Parámetros a analizar

Las soluciones fueron muestreadas en recipientes desinfectados de plástico. Con estos recipientes, se procedió a realizar los ensayos de pruebas físicas y químicas con los equipos del laboratorio de Medio Ambiente realizadas en la Facultad de Ingeniería, Sección de Minas de la PUCP. Los parámetros a controlar fueron los siguientes:

Tabla 13 Parámetros físicos-químicos a analizar

Parámetros	Metales Pesados
pH	Cobre
OD	Zinc
Turbidez	Plomo
Conductividad eléctrica	Cadmio

3.3.2 Metodología de recolección de muestras

El objetivo es obtener muestras representativas de las soluciones creadas y a estudiar, las cuales serán sometidas a análisis de los parámetros físico-químicos de interés.

Los parámetros a evaluar en las subceldas son la conductividad eléctrica (uS/cm), turbidez (NTU), el pH, oxígeno disuelto (mg/L) y AAS o espectroscopia de adsorción atómica (mg/L).

El volumen de los recipientes, elegidos para extraer las muestras, es de 50 ml. Después de extraída las muestras, los recipientes se transportaban al laboratorio para realizar los análisis deseados de cada una de ellas. Esto se realizaba en los siguientes de extraída las muestras para que conserven las características originales in-situ.

Previamente a la recolección de las plantas en campo, se determinaron los puntos de muestreos y el correcto diseño de las celdas, para evitar fugas o contaminación cruzada.

3.3.2.1 Ubicación de puntos de muestreo

Las raíces de las plantas, cuando están debajo del suelo liberan protones en la rizosfera, para incrementar la solubilización de cationes de los metales; para que una vez solubilizados, los metales puedan ser absorbidos a las paredes celulares o que se trasladen pasivamente a través del apoplasto de las raíces (Dalcorsó, Manara, Piasentin, & Furini, 2014).

Debido a que en el experimento se realizó en celdas con agua, los reactivos tuvieron que ser solubilizados para conseguir las concentraciones deseadas; por ende, la mayoría de cationes de metales pesados se trasladaron alrededor de las raíces de las plantas. Para obtener una muestra representativa donde se pudiera observar la hipotética disminución de la concentración de los metales pesados debido a las plantas, se eligió el punto medio entre ambas plantas de cada subcelda como el punto donde se iba a extraer las muestras en los recipientes de plástico, con las correctas medidas de seguridad y protección personal.

3.3.2.2. Descripción del procedimiento experimental

Después de verificar que las celdas están en óptimas condiciones y la creación de una metodología para la obtención de las muestras representativas, se dio inicio a la experimentación.

El primer paso es pesar las cantidades de reactivos determinadas previamente usando una balanza de precisión con una escala mínima de 10^{-5} g. Obtenidas las 8 muestras de reactivos, se procede a depositarlas en vasos de precipitación, llenas de agua destilada, de 500ml y de 1 litro, esta última solo para las muestras que contenían plomo, pues es más difícil disolverlo. Cada uno de los vasos precipitados con las soluciones tendrá que estar aproximadamente 15 minutos en un agitador magnético. Al final de este paso, se obtendrán

vasos precipitados que contendrán cantidades de Cu, Cd, Zn y Pb que para 20 L de agua, tendrán concentraciones de 4, 4, 4 y 5 ppm respectivamente.

Con los vasos precipitados con las soluciones, con los reactivos completamente disueltos, se procederá a verter cada uno en baldes de capacidad de 20 L. Con otro vaso precipitado se procederá a llenar los baldes con agua hasta que se vuelvan 20 L. Se cierran las tapas de los baldes, se rotulan adecuadamente para identificar los metales presentes en cada uno de ellos, y se almacenan en un lugar apartado.



Figura 10 Disolución de los reactivos con un agitador electromagnético

Después, el siguiente paso es obtener las plántulas de *S. Portulacastrum*, las cuales se obtuvieron del Humedal Costero de Puerto Viejo ubicado en el distrito de San Antonio-Chilca, provincia de Cañete, departamento de Lima. El Humedal Costero de Puerto Viejo ya dejó de ser un área protegida; sin embargo, se tuvo mucho cuidado de no dañar la flora y fauna de la zona al momento de obtener las plántulas. Después de obtenerlas, fueron puestas en baldes con lodo en el fondo de ella, este lodo fue extraído también del mismo humedal. Los baldes después fueron cubiertos con una manta de plástico para evitar que al momento de traslado, las plantas fueran afectadas por las corrientes de aire.

Con las plantas ya trasladadas al laboratorio, se procede a llenar las celdas con las soluciones de los baldes. Es decir, la celda N°1 será de Cu, la celda N°2 de Zn, la celda N°3 de Pb, la celda N°4 de Cd, la celda N°5 de Cu y Zn, la celda N°6 de Cu y Pb, la celda N°7 de Cu y Cd, y la celda N°8 de Cu, Zn, Pb, y Cd. Las plantas tienen un contenido de agua aproximado de 90%, por lo cual no se consideró un periodo de tiempo para que las plantas echaran raíces en un agua limpia, pues se prefirió ver su capacidad de adaptación directamente en el agua contaminada de las celdas.

3.3.2.3 Preparación para la toma de muestras

Los recipientes de plásticos deben haber estado almacenados en un lugar donde pudieran no estar en gran cantidad expuestos a polvos. De igual forma, con una botella de pipeta con agua destilada, se lavaban los 8 recipientes que iban a usarse por día. Seguido de esto, se procedía a rotular los recipientes con una codificación de número de subcelda y día del experimento. Por ejemplo, C1D1 quiere decir subcelda N°1 del día 1 del experimento. Todas las muestras fueron extraídas a la misma hora los días que fueron necesarios.

3.3.2.4 Procedimiento de toma de muestras

- Se identifica la subcelda de la cual se extraerá la muestra
- Se identifica el recipiente de plástico cuyo rotulado señala la misma subcelda
- Con un guante impermeable resistente a la acidez, se procede a llenar el recipiente con 50 ml de la solución de la subcelda.
- Retirados los 50ml se procede a llenar la subcelda con la misma cantidad extraída pero ahora de agua de caño.
- Repetir el procedimiento para cada una de las 8 subceldas.

3.3.2.5 Análisis en el lugar de trabajo

Después de tomadas las muestras de las subceldas, se procedió a medir los parámetros establecidos previamente en el plan de muestreo. Terminado los ensayos predeterminados, se cerraban los recipientes con las muestras y eran trasladados a una sección del laboratorio sin humedad y a una temperatura de 15°C para su conservación correcta. Se fueron colectando las muestras diarias de las 8 subceldas por los primeros 8 días, de ahí se tomaron muestras los días 15, 22 y 29; es decir, una cada semana.

3.4 Presentación de resultados

Los ensayos de laboratorio para obtener los parámetros físico-químicos mencionados antes, se hicieron los días seleccionados previamente, es decir, la primera semana, y los días 8, 15, 22 y 29. Por otro lado, las celdas se mantuvieron en el mismo lugar de trabajo y, por ende, en las mismas condiciones ambientales, para reducir posibles variables.

Durante esta etapa de experimentación se lograron obtener los siguientes resultados, los cuales se encuentran en relación con los objetivos planteados al inicio de la presente investigación.

3.4.1 Parámetros físico-químicos:

❖ pH

Se realizó la medición de la acidez del agua contaminada de cada subcelda, para identificar cómo se comportaba este parámetro durante el tiempo de experimentación. Se utilizó un pH-metro de sobremesa para la medida de este parámetro.

Se presenta la siguiente tabla donde se puede observar los resultados obtenidos para su posterior interpretación.

Tabla 14 Resultados del pH de las aguas contaminadas por subcelda

pH											
Celda / día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C1	6.76	6.82	6.8	7.08	7.34	7.4	7.39	7.09	7.31	7.19	7.25
C2	6.66	7	7.07	7.35	7.45	7.49	7.47	7.35	7	7.25	7.34
C3	6.9	7.26	7.28	7.57	7.64	7.55	7.56	7.62	7.47	7.85	7.86
C4	6.78	7.04	6.94	7.12	7.25	7.28	7.39	7.41	7.15	7.38	7.08
C5	6.69	7.06	7.07	7.22	7.39	7.34	7.4	7.45	7.42	7.31	7.18
C6	6.79	7.2	7.09	7.32	7.4	7.43	7.45	7.42	7.39	7.48	7.32
C7	6.72	7.21	7.26	7.54	7.6	7.61	7.56	7.58	7.38	7.48	6.99
C8	6.4	6.84	6.95	7.24	7.37	7.25	7.29	7.32	7.06	7.23	7.04

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de pH obtenidos:

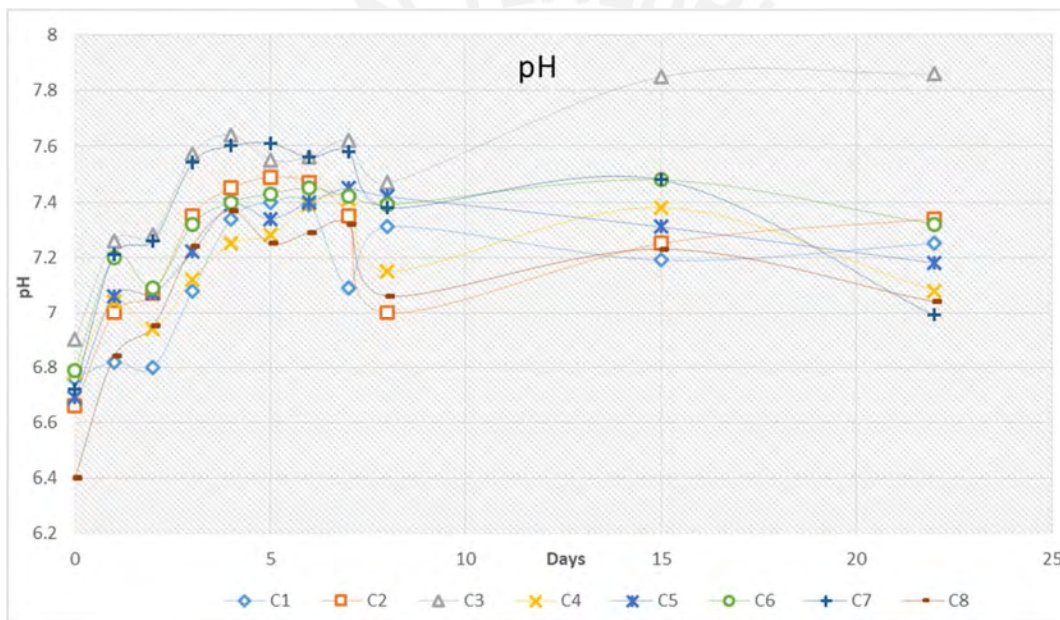


Figura 11 Gráfica de resultados de pH de las subceldas

❖ DO

Se realizó la medición de este parámetro con un oxímetro, para todas las subceldas en todos los días determinados. Se presenta la siguiente tabla donde se pueden observar los resultados obtenidos para su posterior interpretación.

Tabla 15 Resultados del OD de las subceldas

OD (ppm)											
Celda / día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C1	6.31	5.9	5.93	6.08	5.07	5.26	5.28	5.82	6.32	5.54	5.89
C2	4.21	5.95	6.35	6.07	5.98	6.35	6.16	6.21	6.86	6.51	6.24
C3	6.06	5.98	6.08	6.8	6.91	6.15	6.1	6.64	7.48	8.4	6.86
C4	6.28	5.77	6.13	4.76	5.87	5.03	5.52	6.04	5.85	7.42	5.92
C5	6.14	5.73	5.95	5.41	6.4	6.55	5.41	5.32	6.94	6.09	7.08
C6	5.83	5.77	6.81	5.47	5.82	6.43	5.69	5.38	6.27	5.67	6.8
C7	6.3	5.75	6.47	6.4	6.56	6.52	6.44	5.78	5.83	6.58	6.14
C8	6.05	5.96	6.42	6.7	6.22	5.57	5.72	6.09	5.87	6.12	5.42

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de OD obtenidos:

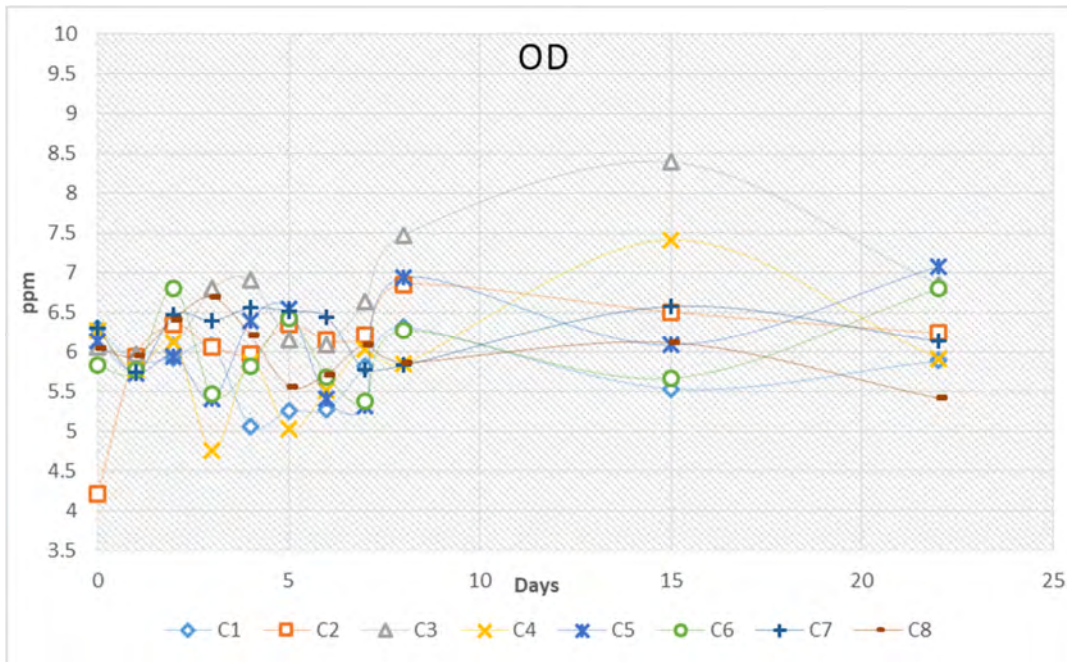


Figura 12 Gráfica de resultados de OD de las subceldas

❖ Turbidez

Se tomaron 10ml de cada muestra a analizar y se colocaron en un turbidímetro, equipo que determina y clasifica la turbidez en unidades nefelométricas (NTU). Se presenta a la siguiente tabla donde se pueden observar los resultados obtenidos para su posterior interpretación.

Tabla 16 Resultados de NTU de las subceldas

Turbidez (NTU)											
Celda / día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C1	4.84	3.39	2.89	2.32	2.15	1.32	1.14	1	2.07	1.33	1.44
C2	2.97	2.47	2.6	1.1	1.3	1.28	1.02	1.1	1.5	0.8	2.36
C3	2.37	2.46	2.02	0.91	1.19	1.08	1.13	1.04	1.65	1.05	1.14
C4	7.63	3.47	2.88	1.12	1.37	1.03	1.02	1.05	2.23	0.95	2.45
C5	3.54	2.82	3.07	1.48	1.36	1.38	1.35	1.52	2	1.63	1.49
C6	3.82	2.46	2.94	2.21	2.42	2.12	1.14	1.25	1.31	0.99	1.5
C7	3.17	2.93	3.04	1.49	1.94	1.88	1.44	1.45	1.5	1.11	1.91
C8	2.84	2.72	2.37	1.84	2.13	1.82	1.25	1.22	2.67	1.19	2.09

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de turbidez obtenidos:

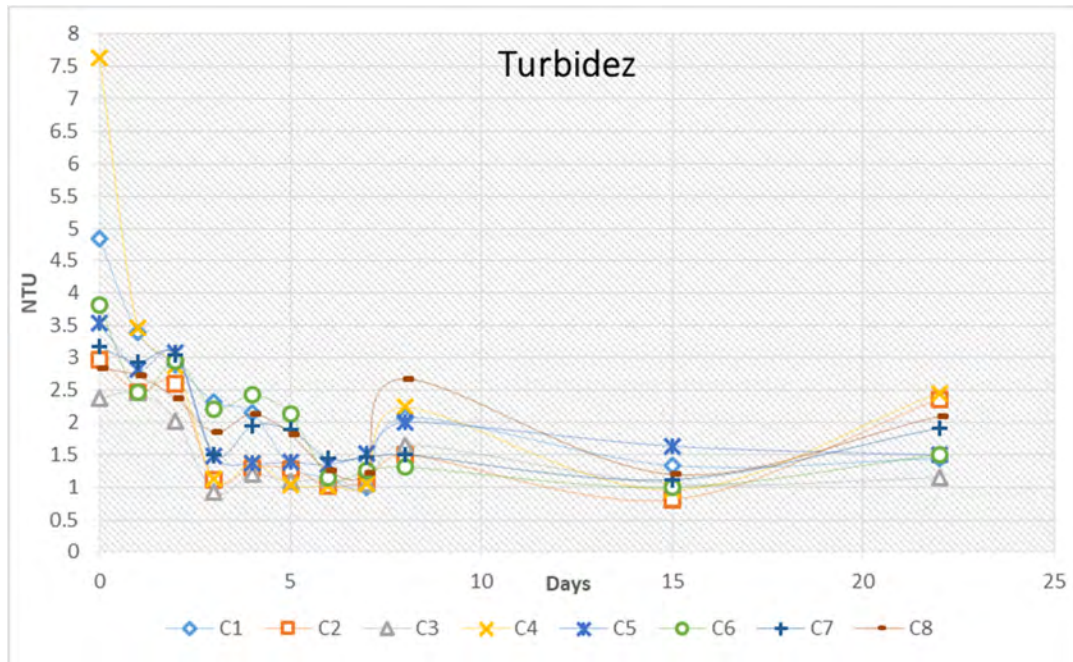


Figura 13 Gráfica de resultados de turbidez de las subceldas

❖ Conductividad

Se realizó la medición de este parámetro con un conductímetro, equipo que determina la conductividad en unidades uS/cm, para todas las subceldas en todos los días determinados. Se presenta la siguiente tabla donde se pueden observar los resultados obtenidos para su posterior interpretación.

Tabla 17 Resultados de NTU de las subceldas

		Conductividad (uS/cm)									
Celda / día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C1	884	857	854	1000	953	1106	1256	1156	1640	1352	1856
C2	820	850	837	828	934	974	1006	928	1120	1189	1839
C3	678	702	730	831	808	861	913	801	993	1070	1111
C4	687	810	848	832	869	989	1006	1042	1150	1235	1583
C5	684	796	842	800	897	940	1029	978	1178	1326	1298
C6	749	822	830	878	931	1002	1050	991	1164	1331	1537
C7	770	857	796	874	809	909	912	880	1030	1166	1340
C8	695	768	826	824	907	960	1061	985	1145	1273	1907

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de conductividad obtenidos:

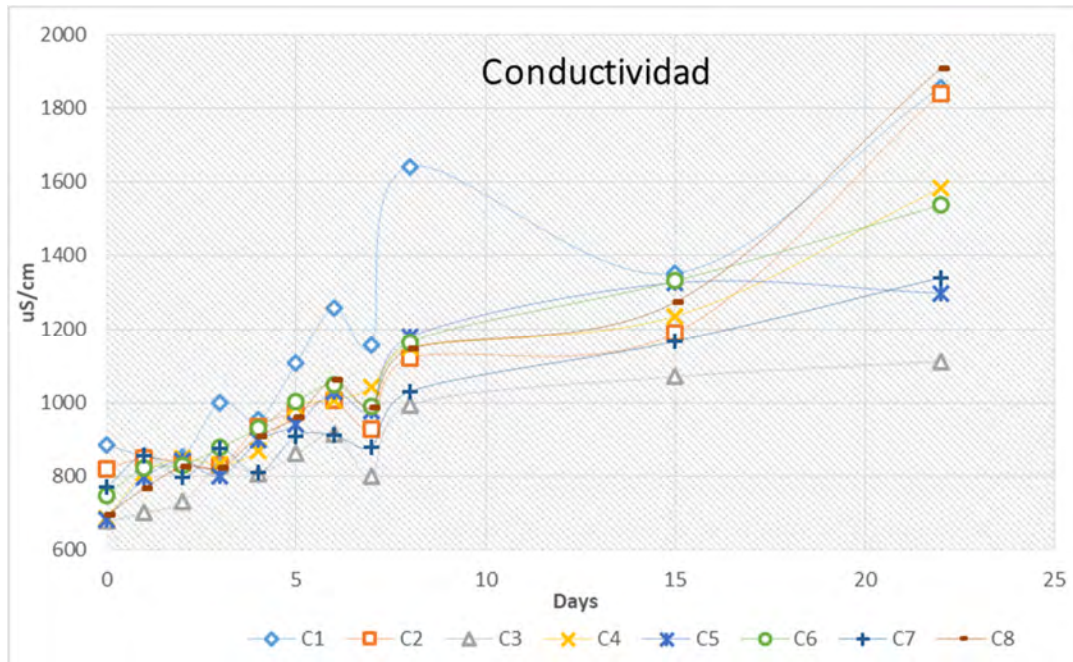


Figura 14 Gráfica de resultados de conductividad de las subceldas

3.4.2 Metales pesados

Se realizaron ensayos con el método de espectroscopia de absorción atómica (AAS) para determinar la concentración de metales pesados requeridos (Cu, Zn, Pb y Cd) de las aguas contaminadas de cada subcelda.

❖ Cobre

Las concentraciones de cobre obtenidas, con el método mencionado, de las muestras del agua contaminada de las subceldas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 18 Concentraciones de Cu determinadas

Celda / día	Cu (ppm)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C1	0.278	0.182	0.123	0.081	0.059	0.072	0.078	0.065	0.108	0.109	0.227
C5	0.094	0.107	0.068	0.017	0.014	0.017	0.022	0.051	0.012	0.058	0.049
C6	0.251	0.113	0.114	0.053	0.051	0.047	0.055	0.056	0.074	0.072	0.091
C7	0.243	0.134	0.05	0.024	0.023	0.018	0.017	0.021	0.034	0.03	0.064
C8	0.147	0.166	0.154	0.079	0.082	0.064	0.065	0.057	0.055	0.066	0.213

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de las concentraciones de cobre a través de los días:

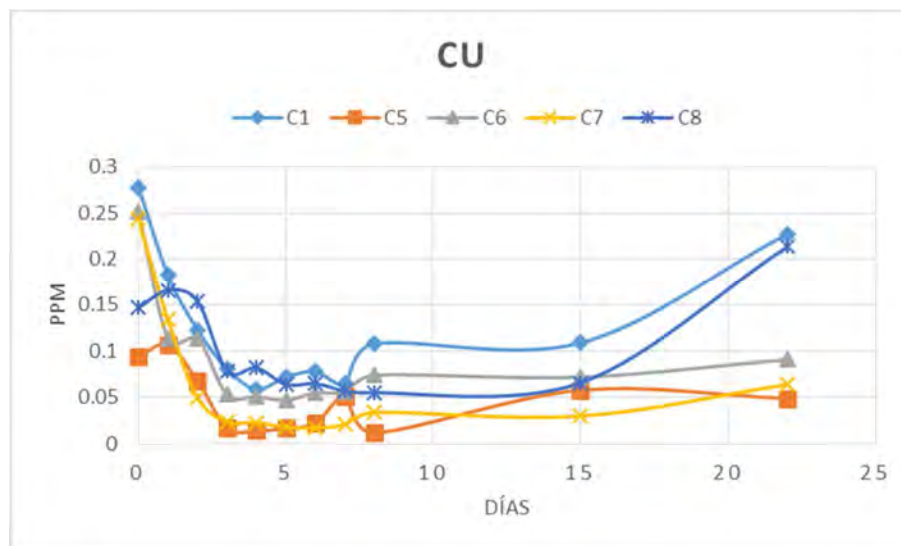


Figura 15 Gráfica de concentraciones de Cu obtenidas

En la siguiente tabla se puede observar los porcentajes de reducción de Cu en los días programados, respecto a la concentración medida el día 0. Como se puede ver, para la celda 1 el día con mayor porcentaje de reducción es el día 4; para la celda 5, el día 8; para la celda 6, el día 5; para la celda 7, el día 6; y para la celda 8, el día 8.

Tabla 19 Porcentajes de reducción del Cu

Porcentaje de Reducción Cu											
Celda / días	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C1	0.00%	34.53%	55.76%	70.86%	78.78%	74.10%	71.94%	76.62%	61.15%	60.79%	18.35%
C5	0.00%	-13.83%	27.66%	81.91%	85.11%	81.91%	76.60%	45.74%	87.23%	38.30%	47.87%
C6	0.00%	54.98%	54.58%	78.88%	79.68%	81.27%	78.09%	77.69%	70.52%	71.31%	63.75%
C7	0.00%	44.86%	79.42%	90.12%	90.53%	92.59%	93.00%	91.36%	86.01%	87.65%	73.66%
C8	0.00%	-12.93%	-4.76%	46.26%	44.22%	56.46%	55.78%	61.22%	62.59%	55.10%	-44.90%

❖ Zinc

Las concentraciones de zinc obtenidas, con el método mencionado, de las muestras del agua contaminada de las subceldas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 20 Concentraciones de Zn determinadas

Zn (ppm)											
Celda / día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C2		0.475	0.155	0.0607	0.0231	0.0183	0.0036	0.0087	0.0079	0.007	0.0135
C5		0.4812	0.2104	0.0697	0.0504	0.0383	0.0359	0.024	0.0017	0.0119	0.0073
C8		0.804	0.4681	0.2137	0.1841	0.1346	0.1162	0.0992	0.0501	0.0074	0.0476

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de las concentraciones de zinc a través de los días:

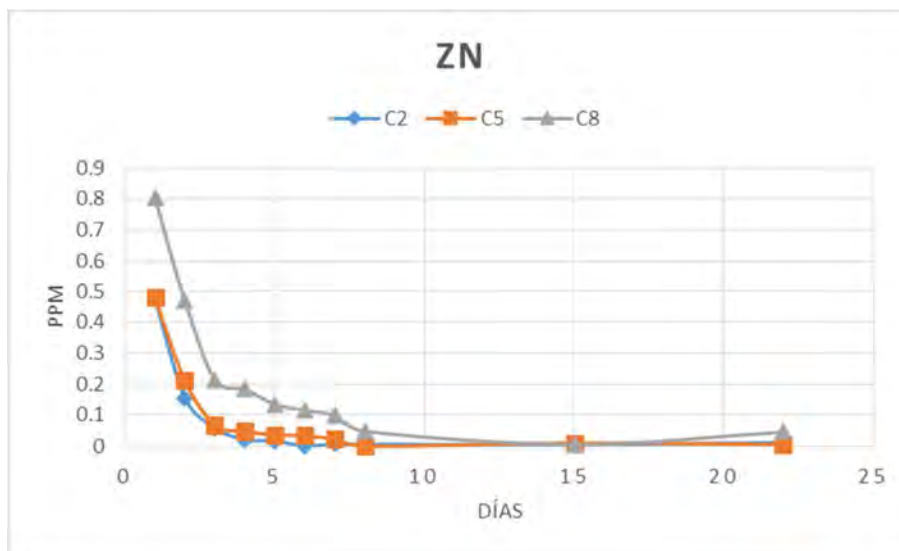


Figura 16 Gráfica de concentraciones de Zn obtenidas

En la siguiente tabla se puede observar los porcentajes de reducción de Zn en los días programados, respecto a la concentración medida el día 0. Como se puede ver, para la celda 2 el día con mayor porcentaje de reducción es el día 6; para la celda 5, el día 8 y para la celda 8, el día 15.

Tabla 21 Porcentajes de Reducción del Zn

		Porcentaje de Reducción Zn										
Celda / días	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22	
C2	0.00%	0.00%	67.37%	87.22%	95.14%	96.15%	99.24%	98.17%	98.34%	98.53%	97.16%	
C5	0.00%	0.00%	56.28%	85.52%	89.53%	92.04%	92.54%	95.01%	99.65%	97.53%	98.48%	
C8	0.00%	0.00%	41.78%	73.42%	77.10%	83.26%	85.55%	87.66%	93.77%	99.08%	94.08%	

❖ Plomo

Las concentraciones de plomo obtenidas, con el método mencionado, de las muestras del agua contaminada de las subceldas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 22 Concentraciones de Pb determinadas

		Pb (ppm)										
Celda / día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22	
C3	0.23	0.1	0.16	0.2	0.18	0.13	0.19	0.16	0.1	0.22	0.21	
C6	0.09	0.15	0.09	0.14	0.21	0.18	0.27	0.27	0.21	0.25	0.26	
C8	0.23	0.28	0.27	0.29	0.34	0.35	0.33	0.31	0.36	0.44	0.37	

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de las concentraciones de zinc a través de los días:

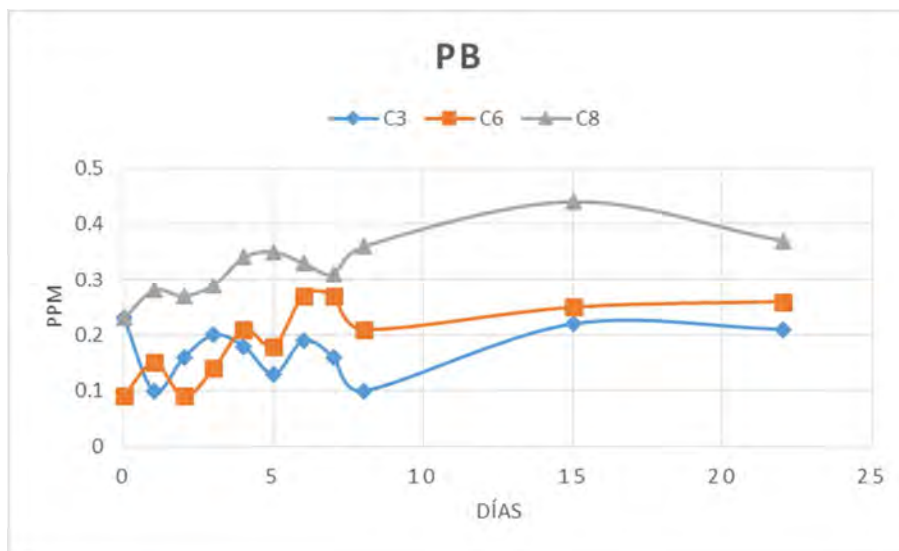


Figura 17 Gráfica de concentraciones de Pb obtenidas

Debido a que las concentraciones de plomo se muestran en oscilación de aumento y reducción, no hay necesidad de mostrar el mejor día con mayor porcentaje de reducción del metal.

❖ Cadmio

Las concentraciones de cadmio obtenidas, con el método mencionado, de las muestras del agua contaminada de las subceldas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 23 Concentraciones de Cd determinadas

	Cd (ppm)										
Celda / día	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C4	0.412	0.563	0.416	0.314	0.274	0.217	0.205	0.15	0.091	0.043	0.053
C7		0.783	0.42	0.303	0.226	0.191	0.157	0.139	0.104	0.047	0.055
C8			0.682	0.533	0.449	0.385	0.328	0.271	0.173	0.077	0.122

En la siguiente gráfica se puede observar los cambios de las concentraciones de cadmio a través de los días:

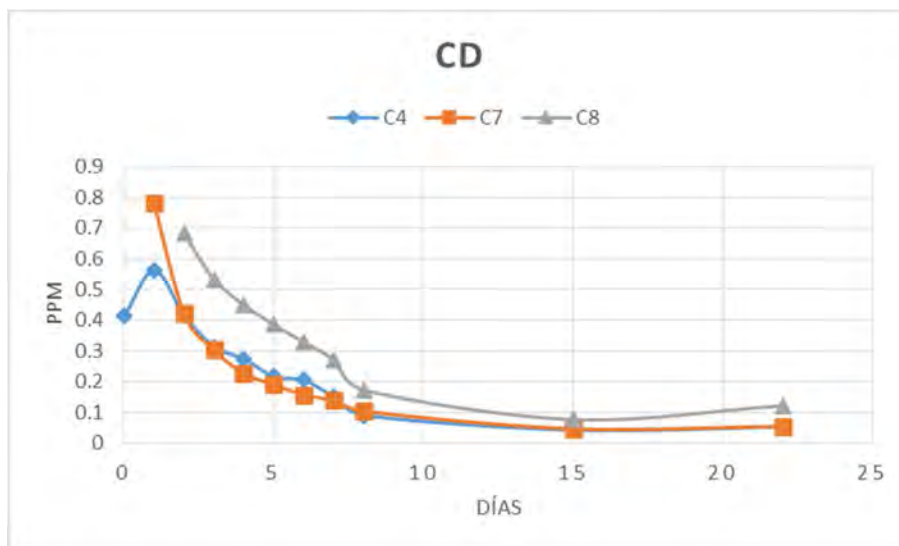


Figura 18 Gráfica de concentraciones de Cd obtenidas

En la siguiente tabla se puede observar los porcentajes de reducción de Cd en los días programados, respecto a la concentración medida el día 0. Como se puede ver, para la todas las celdas, la 4, la 7 y la 8; el día con mayor porcentaje de reducción es el día 15.

Tabla 24 Porcentaje de reducción del Cd

Celda / días	Porcentaje de Reducción Cd										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	15	22
C4	0.00%	-36.65%	-0.97%	23.79%	33.50%	47.33%	50.24%	63.59%	77.91%	89.56%	87.14%
C7	0.00%	0.00%	46.36%	61.30%	71.14%	75.61%	79.95%	82.25%	86.72%	94.00%	92.98%
C8	0.00%	-36.65%	-0.97%	23.79%	33.50%	47.33%	50.24%	63.59%	77.91%	89.56%	87.14%

Capítulo 4: Discusión de Resultados

4.1 Parámetros físico-químicos

❖ Variación del pH

Se puede observar que todas las subceldas mostraron un comportamiento creciente respecto al pH en la primera semana. A lo largo de estos primeros 7 días de tratamiento con las plantas, la celda N°1 pasó de 6.76 a 7.09; la celda N°2, de 6.66 a 7.35; la celda N°3, de 6.9 a 7.62; la celda N°4, de 6.78 a 7.41; la celda N°5, de 6.69 a 7.45; la celda N°6, de 6.79 a 7.42; la celda N°7, de 6.72 a 7.58; y la celda N°8 de 6.4 a 7.32. En el día 8 esta tendencia a crecer solo se mantuvo en la celda N°1, pues en las otras celdas hubo una reducción. Para el día 15, la tendencia a crecer retornó en todas las celdas, excepto en la celda 5. Finalmente, para el día 22, la tendencia a crecer se mantuvo solo en las celdas N°1, 2 y 3, las cuales terminaron con un pH de 7.25, 7.34 y 7.86 respectivamente. En las celdas restantes se redujo el pH, concluyendo con la celda N°4 con 7.08, la celda N°5 con 7.18; la celda N°6 con 7.32; la celda N°7 con 6.99; y la celda N°8 con 7.04.

Se puede observar que los pH iniciales de las muestras empezaron siendo un poco básicos, menores a 7; sin embargo, los pH's terminaron en el rango de 6.99 a 7.34, exceptuando el de la celda N°3 con un valor alejado de 7.86. Cabe recalcar, que esta reducción del pH para el día 22 se debió a que muchas plantas empezaron a morir en las últimas semanas de tratamiento, por lo cual sus propiedades de estabilización de pH también fueron decayendo, lo que se refleja en la disminución de pH.

❖ Variación del OD

Se puede observar que todas las subceldas mostraron un comportamiento oscilante la primera semana, es decir había un crecimiento de concentración un día, y al otro, una reducción. A lo largo de estos primeros 7 días de tratamiento con las plantas, la celda N°1 pasó de 6.31 a 5.82 ppm; la celda N°2 de 4.21 a 6.21 ppm; la celda N°3 de 6.06 a 6.64 ppm; la celda N°4 de 6.28 a 6.04 ppm; la celda N°5 de 6.14 a 5.32 ppm; la celda N°6 de 5.83 a 5.38 ppm; la celda N°7 de 6.3 a 5.78 ppm; y la celda N°8 de 6.05 a 6.09 ppm. Sin embargo, estos no fueron los resultados finales, pues a pesar de no hacer más ensayos diarios, con los resultados podemos observar que la oscilación se mantuvo para los resultados individuales de los días 8, 15 y 22 donde la oscilación fue aumento-reducción-aumento o reducción-aumento-reducción, esto se cumplió en las celdas N°1 que terminó con 5.89 ppm; la celda N°4 con 5.92 ppm; la celda N°5 con 7.08 ppm; la celda N°6 con 6.8 ppm; y la celda N°8 con 5.42 ppm. En las otras celdas no se respetó esta relación aparente, de

igual forma la celda N°2 terminó con 6.24 ppm; la celda N°3 con 6.86 ppm; y la celda N°7 con 6.14 ppm.

❖ **Variación de la turbidez**

Se puede observar que en la primera semana, todas las subceldas mostraron un comportamiento de reducción de la turbidez, este comportamiento era oscilante también; sin embargo, con el resultado final de esa semana se puede observar una reducción visible. A lo largo de estos primeros 7 días de tratamiento, la celda N°1 pasó de 4.84 a 1 NTU; la celda N°2 de 2.97 a 1.1 NTU; la celda N°3 de 2.37 a 1.04 NTU; la celda N°4 de 7.63 a 1.05 NTU; la celda N°5 de 3.54 a 1.52 NTU; la celda N°6 de 3.82 a 1.25 NTU; la celda N°7 de 3.17 a 1.45 NTU; y la celda N°8 de 2.84 a 1.22 NTU.

Sin embargo, debido a la falta de nutrientes, las plantas empezaron a morir en diferentes tiempos a partir de la primera semana, por lo cual su capacidad de reducción de sólidos disueltos también fue afectada y por ende, la turbidez. La cual en el día 22, todas las celdas, excepto la N°5 que terminó con 1.49 NTU, aumentaron su turbidez respecto al día 7. La celda N°1 terminó con 1.44 NTU; la celda N°2 con 2.36 NTU; la celda N°3 con 1.14 NTU; la celda N°4 con 2.45 NTU; la celda N°6 con 1.5 NTU; la celda N°7 con 1.91 NTU; y la celda N°8 con 2.09 NTU.

❖ **Variación de la Conductividad**

Se puede observar que en la primera semana, todas las subceldas mostraron un comportamiento de incremento de la conductividad. A lo largo de estos 7 días de tratamiento con las plantas, la celda N°1 pasó de 884 a 1156 uS/cm; la celda N°2 de 820 a 928 uS/cm; la celda N°3 de 678 a 801 uS/cm; la celda N°4 de 687 a 1042 uS/cm; la celda N°5 de 684 a 978 uS/cm; la celda N°6 de 749 a 991 uS/cm; la celda N°7 de 770 a 880 uS/cm; y la celda N°8 de 695 a 985 uS/cm. Cabe recalcar que fue el día 6 donde se tuvo una mayor conductividad en este rango de los primeros 7 días.

Para el día 22, todas las celdas aumentaron considerablemente su conductividad respecto al día 7, pues la celda N°1 terminó con 1856 uS/cm; la celda N°2, con 1839 uS/cm; la celda N°3, con 1111 uS/cm; la celda N°4, con 1583 uS/cm; la celda N°5, con 1298 uS/cm; la celda N°6, con 1537 uS/cm; la celda N°7, con 1340 uS/cm; y la celda N°8, con 1907 uS/cm.

Asimismo, se puede observar que la celda con todos los metales, la N°8, obtuvo una mayor conductividad; mientras que la celda N°3, la que contenía solo Zn, obtuvo la menor conductividad.

4.2 Metales pesados

4.2.1 Cobre

En general se observa una reducción general del cobre en todas las celdas, aunque el día de mayor reducción varía según cada una de ellas. Por ejemplo, para la celda 1, en la cual solo se encontraba solamente el Cu, el día fue el 4 con una reducción del 78.78%; para la celda 5, con Cu y Zn, el día fue el 8 con una reducción del 87.23%; para la celda 6, con Cu y Pb, el día fue el 5 con una reducción del 81.27%; para la celda 7, con Cu y Cd, el día fue el 6 con una reducción del 93%; finalmente para la celda 8, con Cu, Zn, Pb y Cd, el día fue el 8 con una reducción del 62.59 %. Es posible que en esos días de máxima recuperación las plantas hayan llegado a sus máximas capacidades de absorción individual del Cu o en conjunto con los otros metales pesados. Pues cuando las plantas exceden su umbral de tolerancia, la planta se envenena y puede llevar a la muerte de la planta (Unadkat & Parikh, 2017). Esto podría explicar por qué después de llegar a ese porcentaje de reducción máximo, este empieza a reducirse en los días posteriores.

4.2.2 Zinc

En general se observa una reducción general del zinc en todas las celdas, aunque el día de mayor reducción varía según cada una de ellas. Por ejemplo, para la celda 2, en la cual solo se encontraba el Zn, el día fue el 6 con una reducción del 99.24%; para la celda 5, con Zn y Cu, el día fue el 8 con una reducción del 99.65%; finalmente para la celda 8, con Zn, Cu, Pb y Cd, el día fue el 15 con una reducción del 99.08%. Como se menciona en la sección del cobre, puede que en esos días la planta haya llegado a sus máximas capacidades de absorción, por lo cual luego de llegar a este porcentaje de absorción máximo, este empieza a reducirse en los días posteriores.

4.2.3 Plomo

En el caso del plomo, debido a la oscilación que se puede ver en la figura 13, no se puede determinar un día con la máxima reducción de este metal, pues a pesar que se consiguen días con bajas concentraciones de Pb, al siguiente día la planta expulsara un porcentaje o todo de lo absorbido, lo que significaría ningún avance de reducción; es decir, un falso porcentaje máximo de reducción. Es por este proceso de absorción y expulsión de los metales pesados, que la planta nunca llega al umbral de tolerancia de este metal y el promedio de concentración de Pb permanece constante en todos los días.

4.2.4 Cadmio

En general se observa una reducción general del cadmio en todas las celdas, y en este caso, el día con el mayor porcentaje de reducción es el día 15, aunque varían los

porcentajes máximos alcanzados de reducción. En el caso de la celda 4, con solo Cd, el porcentaje es de 89.56%; en la celda 7, con Cd y Cu, el porcentaje es de 94%; finalmente para la celda 8, con Cd, Cu, Pb y Zn, el porcentaje es de 89.56%. Como se menciona en la sección del cobre, puede que en esos días la planta haya llegado a sus máximas capacidades de absorción, por lo cual luego de llegar a este porcentaje de absorción máximo, este empieza a reducirse en los días posteriores.



Capítulo 5: Evaluación económica de implementación de un humedal de tratamiento flotante

5.1 Presupuesto a escala de laboratorio

A escala de laboratorio no se está considerando el precio del agua contaminada ni de los ensayos de laboratorio, pues a menos que se quiera recrear la presente investigación en otras condiciones ambientales, no es necesario. Esto es debido a que el agua contaminada que se quiera remediar no tendrá que ser creada artificialmente, sino ser traída directamente de un lago, laguna o cuerpo de agua que este contaminado. En la siguiente tabla se puede observar el presupuesto a escala de laboratorio:

Tabla 25 Presupuesto a escala de laboratorio

Presupuesto a Escala de Laboratorio	Fitorremediación con <i>S. Portulacastrum</i>			
	Cantidad de Celdas		4	
Material	Unidad	Precio Unit.	Costo/Celda	Total
Plancha Acrílica 1.8mx1.2mx3mm	1	S/.160.00	S/.160.00	S/.640.00
Tubo de PVC SEL 1 1/2" 3m	4	S/.10.90	S/.43.60	S/.174.40
Conexión T PVC 1 1/2" SP	4	S/.7.00	S/.28.00	S/.112.00
Cemento para CPVC 118 ml	1	S/.15.90	S/.15.90	S/.63.60
Base de madera	1	S/.19.90	S/.19.90	S/.79.60
Balde de Plástico 20 L	2	S/.12.90	S/.25.80	S/.103.20
Plántulas de <i>S.Portulacastrum</i>	4	S/.0.93	S/.3.72	S/.14.88
Piedra Chancada 1/2" 40 Kg	1	S/.5.50	S/.5.50	S/.22.00
Agua Contaminada	1	S/.0.00	S/.0.00	S/.0.00
Ensayos de laboratorio	1	S/.0.00	S/.0.00	S/.0.00
TOTAL			S/.302.42	S/.1,209.68

* Precios de Referencia - Sodimac

5.2 Valorización económica a escala real

Debido a que la longitud de los tallos de la especie vegetal *S. Portulacastrum*, a pesar de contar con una gran longitud, esta no es perpendicular, lo cual evitaría su correcto funcionamiento en un humedal artificial. Por ende, se ha elegido el método de humedal de tratamiento flotante para la especie vegetal de esta investigación. Por ende, se ha diseñado una balsa de flotación, con una espuma de polietileno de dimensiones de 100 x 200 x 5 cm, la cual será cubierta con papel aluminio en los costados y se le harán huecos de 1 cm de diámetro donde se colocarán las plántulas. Un diseño inicial de 162 huecos con separaciones de 11 cm entre ellos horizontal y verticalmente se ha propuesto, aunque estos se podrían reducir después de ver su eficiencia en un caso real. Debajo de la espuma de polietileno se ha diseñado el uso de un tubo de PVC que rodearía los bordes por debajo de la espuma para aumentar su flotabilidad. El diseño se puede ver en la siguiente figura:

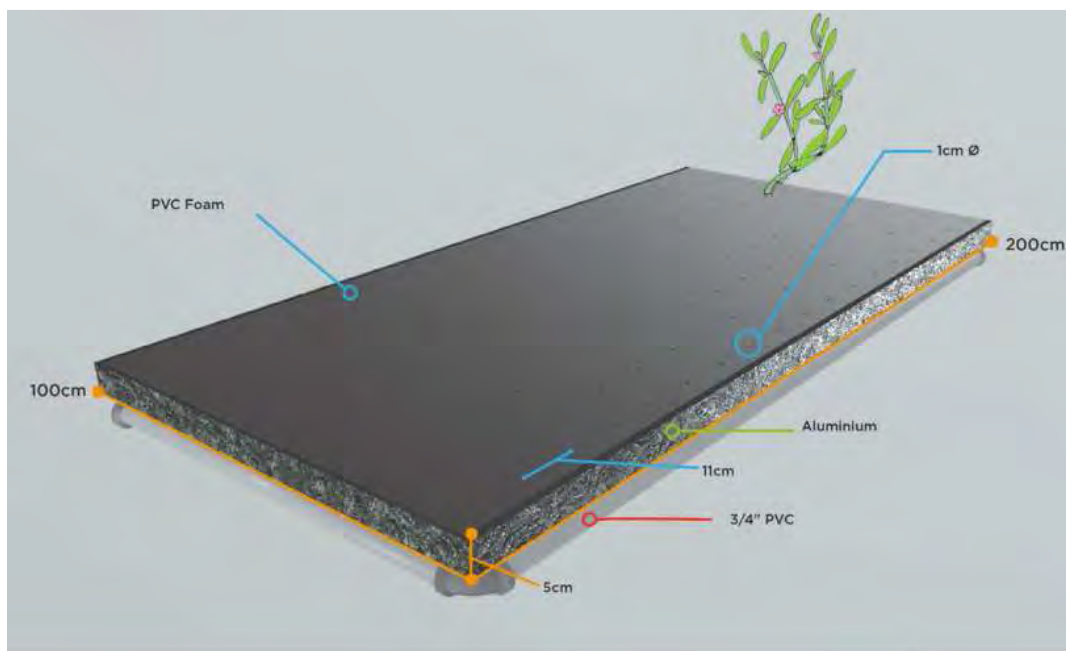


Figura 19 Diseño de balsa para FTW

Para este diseño individual de esta balsa se ha elaborado el siguiente presupuesto:

Tabla 26 Presupuesto a Escala Real

Presupuesto a Escala Real	Fitorremediación con <i>S. Portulacastrum</i> por FTW			
	Material	Units	Unit Price	Total
Espuma de polietileno (2x1x0.05m)	1	S/ 104.00	S/ 104.00	S/ 104.00
Tube SEL 3/4" PVC	4	S/ 2.50	S/ 10.00	S/ 10.00
Elbow PVC 3/4" x 90°SP	4	S/ 1.70	S/ 6.80	S/ 6.80
Cement for CPVC 118 ml	1	S/ 15.90	S/ 15.90	S/ 15.90
Aluminium Paper	1	S/ 17.90	S/ 17.90	S/ 17.90
Seedling of <i>S.Portulacastrum</i>	162	S/ 0.93	S/ 150.66	S/ 150.66
TOTAL			S/ 305.26	S/ 305.26

* Reference Prices - Sodimac

Este presupuesto es para solamente una balsa; sin embargo, para una valorización más precisa según el área del cuerpo de agua a querer tratar, se propondrá el siguiente ejemplo, considerando un hipotético tratamiento a la laguna El Toro, ubicada en el distrito de Quiruvilca, provincia de Santiago de Chuco, departamento de La Libertad, Perú.

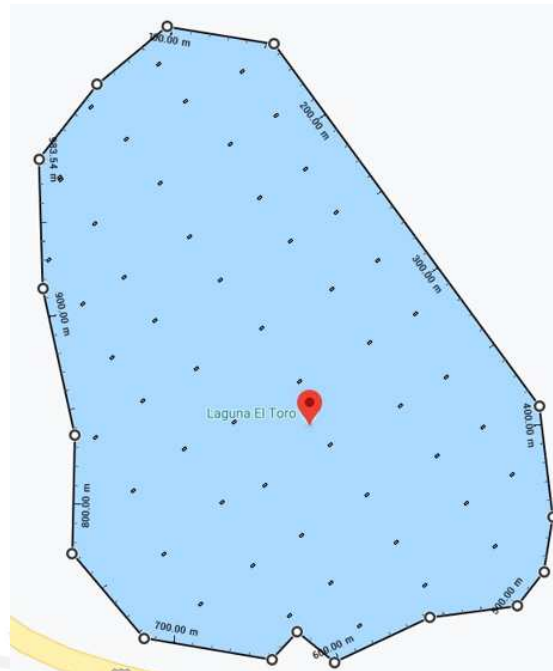


Figura 20 Malla de distribución de las balsas (Google Maps)

Como se ve en la figura 16, se ha distribuido 53 de las balsas diseñadas previamente, para que cubrieran la mayor parte del área de la laguna equidistantemente. Las 53 balsas costarían en total S/. 16,178.78, mientras que el área de la laguna es aproximadamente 64,087.86 m², por lo que el costo inicial de este tratamiento sería S/. 0.25 por metro cuadrado del área del cuerpo de agua. Sin embargo, considerando los días de mayor de reducción de los metales de la celda 8, que debido a que tenía 4 metales pesados en conjunto, se podría asemejar a una situación real de contaminación; el mejor día para hacer el cambio de plantas, si es que se repite la condición de que las plantas morirán después de llegar a su día de máxima reducción, sería el día 13. Entonces cada 13 días se tendría un aumento de costo de S/. 7984.98 debido al cambio de plantas.

Por otro lado, si la especie vegetal de esta investigación logra adaptarse a las condiciones ambientales y contaminación del cuerpo de agua, estas empezarán a crecer y obtener plántulas nuevas, cortando cuidadosamente los tallos nuevos, se volvería un proceso sostenible.

Capítulo 6: Conclusiones

- Se logró diseñar un sistema de tratamiento de aguas contaminadas a través de humedales flotantes de tratamiento, donde se aprovecha la capacidad de absorción y resistencia de la especie vegetal *S. Portulacastrum* a ambientes contaminados.
- Las concentraciones de contaminantes metálicos en el agua, a excepción del plomo técnicamente, disminuyeron a través del tiempo de tratamiento con respecto a la concentración inicial de 4 ppm. Las concentraciones finales de los metales pesados en los días de mayor reducción, se encontraban por debajo de los LMP.
- El pH fue disminuido a lo largo de los días de tratamiento desde un rango de 6.6 a 6.8 a un rango de 7 a 7.4. Los niveles óptimos para fomentar la vida de los peces está en el rango de 6.5 a 9; sin embargo, con el rango obtenido a final de la investigación, se fomenta la vida de cangrejos, caracoles y almejas (Kemker, 2013).
- La conductividad aumentó a lo largo de los días de tratamiento desde un rango de 680 a 900 uS/cm a un rango de 1110 a 1907 uS/cm. Esto fue debido a que a pesar de que se reponía el agua extraída para las muestras de los días determinados, no se podía controlar la evaporación natural del agua. Esto tiene que ver con el aumento de la conductividad, porque la evaporación se lleva el agua pero no lleva consigo la sal (Rahmanian & Ali, 2015).
- El oxígeno disuelto aumentó a lo largo de los días de tratamiento desde un rango de 5.8 a 6.3 ppm a un rango de 5.92 a 7.08 ppm. El rango de DO que los peces necesitan para vivir es desde 4 a 12 ppm; con un rango de 6.5 a 9.5 ppm, donde los peces grandes pueden vivir (Graydon, 2014). Con el rango obtenido al final de tratamiento se logró crear un ambiente propicio para los peces grandes.
- La turbidez disminuyó a lo largo de los días de tratamiento desde un rango de 3 a 4 NTU a un rango de 1 a 2.5 NTU; sin embargo, se logró el rango más bajo de valores se obtuvo en el día 15 con un rango de 0.5 a 1.5 NTU. Por lo que se propiciaría la vida marina y se crearía un impacto paisajista positivo en una escala real.
- La especie vegetal *S. Portulacastrum* mostró capacidad de absorción del Cu, Zn y Cd; sin embargo en el caso del Pb, la planta mostró que a pesar de que absorbe una cantidad considerable del metal, lo expulsa al día siguiente.
- Como se aprecian en las gráficas de la sección 3.4.2, a partir del día 15, las concentraciones de algunos metales pesados empezaron a aumentar nuevamente, esto se debió a la muerte de las plantas después que llegaron a absorber las concentraciones de estos metales que superaron sus umbrales de tolerancia.
- El Cu obtuvo una mejor reducción en el rango de tiempo del tratamiento cuando se encontraba en la celda solo junto al Cd, y la peor reducción cuando se encontraba en la celda solo de Cu.

- El Zn obtuvo una mejor reducción en el rango de tiempo del tratamiento cuando se encontraba en la celda solo junto al Cu, y la peor reducción cuando se encontraba en la celda junto al Cu, Pb y Cd.
- El Pb obtuvo una mejor reducción promedio en el rango de tiempo del tratamiento cuando se encontraba en la celda solo, y la peor reducción cuando se encontraba en la celda junto al Cu, Zn y Cd.
- El Cd obtuvo una mejor reducción en el rango de tiempo del tratamiento cuando se encontraba en la celda solo, y la peor reducción cuando se encontraba en la celda junto al Cu, Zn y Pb.
- Los metales pesados más contaminantes, como el Cd y Pb, saturan en mayor porcentaje a la especie vegetal *S. Portulacastrum*, y es debido a eso que sus mayores reducciones se obtuvieron cuando se encontraban en las celdas donde el agua contaminada solo se encontraban ellos individualmente.
- El mejor día para reemplazar las plantas de acuerdo al día de mayor reducción porcentual de los metales pesados son:
 - Para la celda N°1 (Cu), el día 4
 - Para la celda N°2 (Zn), el día 6
 - Para la celda N°3 (Pb), el día 8
 - Para la celda N°4 (Cd), el día 15
 - Para la celda N°5 (Cu, Zn), el día 8
 - Para la celda N°6 (Cu, Pb), el día 5
 - Para la celda N°7 (Cu, Cd), el día 11
 - Para la celda N°8 (Cu, Zn, Pb, Cd), el día 13.
- Una repetición del experimento realizado en la presente investigación costaría aproximadamente S/. 1209.68, sin incluir los costos de crear agua contaminada artificialmente y los ensayos de laboratorio con los cuales se obtuvo un registro de los cambios de los parámetros seleccionados a lo largo del rango de tratamiento.
- Un proyecto a escala real del humedal flotante de tratamiento costaría inicialmente S/. 16,178.78, en el peor caso de que las plantas no se adaptaran, o llegaran a absorber contaminantes que superaran sus umbrales de tolerancia, el costo de reemplazar todas las plantas sería de S/. 7,984.98. Sin embargo, si algunas plantas lograron adaptarse y continúan su crecimiento, las nuevas plántulas a reemplazar podrían conseguirse directamente de cortar los nuevos tallos de las plantas adaptadas.

Capítulo 7: Recomendaciones

- Antes de implementar el proyecto de humedales flotantes de tratamiento, podría ser recomendable colocar las plantas en celdas similares a las mostradas en esta investigación, solo que en este caso solo se tendría que usar el agua contaminada directamente del cuerpo de agua a querer remediar; con el objetivo de querer adaptar a la planta u observar su resistencia.
- Si es que se quisiera repetir el experimento de la presente investigación, se recomienda que para eliminar la variable de la muerte de las plantas, debido a la falta de nutrientes, se alimente a las plantas con aditivos nutricionales constantemente en un rango de tiempo adecuado.
- Para el diseño de la malla de distribución de las balsas, se debe tomar en cuanto el caudal del cuerpo de agua, pues si este es relativamente alto se deben considerar materiales adicionales para fijar las balsas y que no terminen golpeándose entre ellas.
- Un estudio adicional sobre las propiedades de la especie vegetal *S. Portulacastrum* sobre la capacidad de sus raíces para trasladar los cationes de metal podría ayudar a optimizar el diseño del humedal flotante de tratamiento para reducir la cantidad de plantas a usar.
- Se recomienda someter a la especie vegetal *S. Portulacastrum* a otros metales pesados para aumentar su repertorio de estos que puede absorber, remover y tolerar. Ya que en casos de remediación de lagos contaminados se puede tener un mayor grado de confiabilidad al momento de usar a la planta como medida de tratamiento.

Bibliografía

- (EEA), E. E. A. (2015). Progress in management of contaminated sites — European Environment Agency. Retrieved from <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites/progress-in-management-of-contaminated-1>
- A Poma, P. (2013). Intoxicación por plomo en humanos. *Anales de La Facultad de Medicina*, 69(2), 120. <https://doi.org/10.15381/anales.v69i2.1155>
- ATSDR, A. para S. T. y el R. de E. (2004). Resumen de Salud Pública. Cobre. *Departamento de Salud y Servicios Humanos de Los EE.UU.*, 8. Retrieved from https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs132.html
- Ayyappan, D., Sathiyaraj, G., & Ravindran, K. C. (2016). Phytoextraction of heavy metals by *Sesuvium portulacastrum* L. a salt marsh halophyte from tannery effluent. *International Journal of Phytoremediation*, 18(5), 453–459. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109606>
- Dalcorso, G., Manara, A., Piasentin, S., & Furini, A. (2014). Nutrient metal elements in plants. *Metallomics*, 6(10), 1770–1788. <https://doi.org/10.1039/c4mt00173g>
- David J. (2013). Floating Treatment Wetlands. *Ph.D. Student, Biological Systems Engineering*, (1), 1–5. Retrieved from www.ext.vt.edu
- 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.
- El Peruano, D. (2010). Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM. 2010.
- El Peruano, D. (2013). Decreto Supremo Nro. 002-2013-MINAM “Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.” 2013, 491497–491500.
- Feng, J., Lin, Y., Yang, Y., Shen, Q., Huang, J., Wang, S., ... Li, Z. (2018). Tolerance and bioaccumulation of combined copper, zinc, and cadmium in *Sesuvium portulacastrum*. *Marine Pollution Bulletin*, 131(April), 416–421. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.049>
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48–60.
- Gamble, J. S. (1929). Flora of the Presidency of Madras. *Nature*, 124(3125), 440–440. <https://doi.org/10.1038/124440d0>
- 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.
- Girbau Garcia, M. R. (2002). La contaminación del agua. *Ciencias de La Tierra y Del Medio Ambiente*, 1–5. Retrieved from <http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/00General/IndiceGral.html>
- Graydon, J. (2014). *Dissolved Oxygen Presentation*. Retrieved from <http://www.h2ou.com/h2wtrqual.htm#Oxygen>
- Headley, T. R., & Tanner, C. C. (2008). Floating Treatment Wetlands : an Innovative Option for Stormwater Quality Applications. 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 1101–1106.g Treatment Wetlands : an Innova. *11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 1101–1106. Retrieved from <http://frogenvironmental.co.uk/wp-content/uploads/2014/09/Headley-and-Tanner-2008-FTW-for-stormwater-applications.pdf>
- ICMM. (2019). Tailings management. Retrieved from <https://www.icmm.com/en-gb/environment/tailings>
- Kemker, C. (2013). pH of Water - Environmental Measurement Systems. *PH of Water.” Fundamentals of Environmental Measurements.*, pp. 1–16. Retrieved from <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/ph/>
- Koshal, R. K. (1976). Water pollution and human health. *Water, Air, and Soil Pollution*, 5(3), 289–297. <https://doi.org/10.1007/BF00158344>
- Li, X., Wang, X., Chen, Y., Yang, X., & Cui, Z. (2019). Optimization of combined phytoremediation for heavy metal contaminated mine tailings by a field-scale orthogonal experiment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168(September 2018), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.012>
- Minam. (2008). *Estandares Nacionales de la Calidad Ambiental del Agua* (pp. 1–6). pp. 1–6.
- MINAM. (2005). *Ley General del Ambiente*. 1–168.
- Ministerio de Energía y Minas. (2005). *Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros*. 12, 42.
- Montanarella, L., Pennock, D., & Mckenzie, N. (2016). *Estado mundial del recurso del suelo*.
- Núñez, R., Vong, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Fitorremediacion*, 4, 15.

- <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Pulcha, J., & Valencia, M. (2019). Evaluación de la degradación de contaminantes ecotóxicos de las aguas de residuales de la industria minera por medio de humedales artificiales. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rahmanian, N., & Ali, S. H. . (2015). Analysis of Physico-chemical Parameters to Evaluate the Drinking Water Quality. *Journal of Chemistry*, 0–1. Retrieved from <http://www.enr.gov.nt.ca/sites/default/files/conductivity.pdf>
- Roche, C., Thygesen, K., & Baker, E. (2017). *Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme*. Retrieved from https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/371/original/RRA_MineTailings_lores.pdf?1510660693
- Rostami, S., & Azhdarpoor, A. (2019). The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: A review. *Chemosphere*, 220, 818–827. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.203>
- Rubio, C., González Weller, D., Martín-Izquierdo, R. E., Revert, C., Rodríguez, I., & Hardisson, A. (2007). El zinc: Oligoelemento esencial. *Nutricion Hospitalaria*, 22(1), 101–107. <https://doi.org/10.23853/bsehm.2001.0510>
- SERFOR. (2018). *Humedal Costero Puerto Viejo Datos de Coordinación*. 1–10.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2019). Preguntas Frecuentes sobre Relaves – SERNAGEOMIN. Retrieved from <http://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- Soylak, M., Tuzen, M., Narin, I., & Sari, H. (2004). Comparison of microwave, dry and wet digestion procedures for the determination of trace metal contents in spice samples produced in Turkey. *Journal of Food and Drug Analysis*, 12(3), 254–258.
- Unadkat, K., & Parikh, P. (2017). International Journal of Allied Practice , Research and Review A Review on Heavy Metal Absorption Capacity of Aquatic Plants : Sources , Impact and Remediation Technique. *UGC JOURNAL NUMBER 44557 IJAPRR International Peer Reviewed Refereed Journal*, IV(December), 23–30.
- Vásquez Tenorio, W. (2015). *Fitorremediación con Sesuvium Portulacastrum para disminuir la contaminación salina de suelos en San Juan La Punta Tumán, 2015* (Universidad César Vallejo). Retrieved from

<http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/27098>

Wörterbuch, B. (2015). *INTERNATIONAL STANDARD Soil quality — Vocabulary*. 2015.

Zaier, H., Ghnaya, T., Ghabriche, R., Chmingui, W., Lakhdar, A., Lutts, S., & Abdelly, C. (2014). EDTA-enhanced phytoremediation of lead-contaminated soil by the halophyte *Sesuvium portulacastrum*. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(12), 7607–7615. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2690-5>



Anexo 1: Constancia de determinación de especie vegetal.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
MUSEO DE HISTORIA NATURAL



"Año de la universalización de la Salud"

CONSTANCIA N° 027-USM-2020

LA JEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (planta completa), recibida de **FRANCISCO EDUARDO GIL HURTADO**, estudiante de la Pontificia Universidad Católica del Perú; ha sido estudiada y clasificada como: ***Sesuvium portulacastrum* L.** y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de APG IV (2016):

ORDEN: CARYOPHYLLALES

FAMILIA: AIZOACEAE

GENERO: *Sesuvium*

ESPECIE: *Sesuvium portulacastrum* L.

Nombre vulgar: "verdolaga"

Determinado por: Dr. Asunción A. Cano Echevarría

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para los fines que estime conveniente.

Lima, 05 de febrero de 2020



Joaquina Albán Castillo
Dra. Joaquina Albán Castillo
JEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

JACddb