

**PROPUESTA PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS AFECTADOS POR EL  
SECTOR MINERO EN YALÍ ANTIOQUIA, COLOMBIA MEDIANTE LA CÁSCARA DE  
MANIHOT ESCULENTA**

**VALERIA AGUDELO ESCUDERO  
LIZETH ANDREA MENDIGAÑA LADINO**

**Proyecto integral de grado para optar el título de  
INGENIERA QUÍMICA**

**Directora:  
ANGIE TATIANA ORTEGA RAMÍREZ  
Ingeniería química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.  
2023**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente Jurado**

---

Ing. Diana Carolina Garzón Velasco  
**Firma Jurado**

---

Ing. Angie Tatiana Ortega Ramírez  
**Firma del Director**

---

Ing. Diana Cuesta Parra  
**Firma Jurado**

**Bogotá D.C. Julio 2023**

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

### **Presidente Institucional y Rector del Claustro**

Dr. Mario Posada García-Peña

### **Consejero Institucional**

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

### **Vicerrectora Académico y de Posgrados**

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

### **Vicerrector Administrativo y Financiero**

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

### **Decano Facultad de Ingenierías**

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

### **Director del Programa de Ingeniería Química**

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## DEDICATORIA

*Primeramente, agradezco a Dios por haberme otorgado las habilidades y capacidades para estudiar una carrera como lo es la ingeniería química que hoy está por culminar esta etapa de pregrado. A mi madre Marlen Escudero Torres, quien me brindó la fortuna de estudiar durante estos largos años y siempre estuvo junto a mí en momentos de tristezas, frustraciones, llantos y alegrías que he sobrellevado en esta carrera, no alcanzan las palabras para decir lo agradecida que estoy por todos los sacrificios que has hecho por mí, soy la hija más afortunada por tener una madre como tú. Este logro es para ti, has sido y siempre serás mi motivación para seguir adelante sin importar los obstáculos que se presenten en el camino.*

*A mí papá, a quien dedico este esfuerzo y sacrificio. Sé que desde el cielo me cuidas y me bendices, lamento profundamente que no pudiste verme graduada, pero en tu memoria dedico esta tesis. Te amo con toda mi vida, gracias infinitamente por la fe que tuviste siempre en mí.*

*A mis amistades Daniela, Valentina y Alejandro, agradezco su paciencia y dedicación al tener conmigo en diferentes momentos y estuvieron siempre junto a mí ayudándome para ser una mejor estudiante, infinitas gracias.*

*A mi compañera Andrea, quien ha sido una pieza fundamental y un apoyo incondicional en esta etapa de mi vida. Quiero expresar mi infinita gratitud por la bondad y la tolerancia que ha tenido conmigo, por lo que, te llevas una compañera que estará siempre a tu disposición cada vez que lo necesites. Te deseo de todo corazón que triunfes y alcances siempre tus sueños, porque me has demostrado que nada es más grande que tú y que vas a devorarte el mundo.*

*Nuevamente gracias y te deseo muchas bendiciones en tú vida, te admiro por esa fortaleza tan firme que tienes.*

*Finalmente, a todo el cuerpo académico de la Fundación Universidad de América por brindar cada peldaño para construirme como estudiante y futura profesional en la ingeniería química, no solo por la formación académica sino por la formación humana.*

**Valeria Agudelo Escudero**

*Quiero agradecerle a Dios por haberme permitido pasar estos años en mi universidad de los cuales me llevo grandes recuerdos, agradezco por esta etapa, por los profesores y compañeros que me permitieron crecer personal y profesionalmente, doy gracias a mi directora de tesis Angie Ortega por confiar en este proceso y brindarme su apoyo y tiempo, me siento afortunada de las grandes habilidades que logré desarrollar y haber llegado a este punto culminando una tesis que me llena de orgullo me demuestra la gran profesional en la que me convertiré.*

*Para mi compañera Valeria todo mi respeto y admiración por este logro que compartimos, que a pesar de las dificultades que se presentaron a lo largo de este proyecto, siempre demostró mediante sus habilidades ser una persona capaz de lograr todo lo que se propone, tengo la certeza de lo orgulloso que se debe sentir su padre por la gran mujer que es. En mí siempre encontrará un apoyo en cada paso tanto profesional como personal, sé que de aquí en adelante la vida te premiará con infinidad de cosas maravillosas y me sentiré completamente orgullosa de eso.*

*Agradezco a mis hermanas, por la compañía que me brindaron todos estos años, por las noches que parecían no terminar y siempre contaba con sus palabras de apoyo las cuales me llenaban de aliento para no desfallecer, por las risas y lágrimas que acompañaron toda mi carrera universitaria, porque ustedes siempre me hicieron sentir más fuerte de lo que era; agradezco a mis padres Jorge y Claudia, que desde el primer día confiaron en mí y me llenaron de fortaleza para superar cada obstáculo, les doy gracias por hacer de mí una mujer perseverante, fuerte y dedicada, que sin ellos nada de esto hubiera sido posible, te agradezco a ti mami por levantarme todas las veces que he caído, por ser mi polo a tierra, por ser mi inspiración y mis ganas de luchar cada día, te doy gracias por hacerme sentir cada día orgullosa de la persona que soy, por recordarme todas las habilidades que poseo y lo valiosa que soy es por esto que a ustedes les dedico este gran logro.*

*Por último, le agradezco a Dios y a la vida por cada una de las personas que me acompañaron en este proceso y que comparten este logro como si fuera suyo también,*

*a esas personas que en su momento les brinde mis más sinceras palabras de agradecimiento por la compañía que fueron para mí en mis grandes y pequeños pasos, gracias porque fueron parte fundamental para culminar esta etapa.*

**Andrea Mendigaña Ladino**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A nuestra directora Angie Tatiana Ortega Ramírez Ingeniería Química, agradecemos infinitamente su orientación, acompañamiento y conocimientos para poder ejecutar este proyecto de investigación. En el cual, nos has enseñado que no solo prevalece la importancia de la formación académica sino también la formación humana. No sirve ser la mejor ingeniería en ausencia de ética y valores. De igual manera agradecemos el enfoque de nuestro proyecto, nos enseñaste la importancia y las dimensiones de las prioridades que debemos de tener en cuenta como ingenieras antes de plantear y ejecutar un proyecto, siempre poniendo por delante el bien común como sociedad.*

*A la Fundación Universidad de América por cada enseñanza que nos brindaron para ser unas grandes profesionales y servir a la comunidad.*

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>18</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>19</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>21</b>
<b>1. GENERALIDADES Y MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>22</b>
1.1 Identificación del problema	22
1.2 Justificación del proyecto	24
1.3 Antecedentes	25
1.4 Relaves mineros	30
1.5 Metales pesados	31
1.5.1 Mercurio	32
1.5.2 Plomo	35
1.5.3 Analizador XRF portátil	36
1.6 Minería en Colombia	37
1.6.1 Minería en Antioquia	37
1.6.2 Relaves mineros clasificaciones	38
1.6.3 Problemas generales por la minería	42
1.6.4 Convenio de Minamata	43
<b>2. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO AFECTADO POR ACTIVIDAD MINERA EN YALÍ ANTIOQUIA</b>	<b>44</b>
2.1 Municipio de Yalí Antioquia, Colombia	44
2.2 Importancia del suelo	46
2.3 Características físicas de la muestra del relave minero	47
2.3.1 Rango de concentraciones de metales pesados	54
2.4 Determinación de materia orgánica en muestra del suelo relave minero Yalí	54
2.4.1 Método de Walkley – Negro	55
2.4.2 Técnica volumétrica	55
2.4.3 Técnica colorimétrica	60
2.4.4 Método de calcinación	64
<b>3. CARACTERIZACIÓN CÁSCARA MANIHOT ESCULENTA</b>	<b>67</b>

3.1 Composición <i>Manihot esculenta</i>	67
3.1.1 <i>Ácido cianhídrico</i>	69
3.1.2 <i>Amilosa</i>	72
3.1.3 <i>Amilopectina</i>	73
3.2 <i>Manihot esculenta</i> en Colombia	75
3.2.1 <i>Importancia del suelo</i>	75
3.2.2 <i>Importancia de la siembra</i>	76
3.2.3 <i>Control de maleza</i>	76
3.2.4 <i>Zonas productoras de Manihot esculenta</i>	77
3.3 Selección de yuca	79
3.4 Consecuencias ambientales de la cosecha de la yuca	81
3.5 Tecnología de adsorción del mercurio mediante <i>Manihot esculenta</i>	83
<b>4. IMPLEMENTACIÓN DE LA MANIHOT ESCULENTA</b>	<b>84</b>
<b>5. REMOCIÓN DE MERCURIO MEDIANTE LA CÁSCARA DE MANIHOT ESCULENTA</b>	<b>86</b>
5.1 Primera medición en la muestra del suelo contaminado	86
5.2 Segunda medición en la muestra del suelo contaminado	91
5.2.1 <i>Cáscara de yuca amarilla</i>	91
5.2.2 <i>Cáscara de yuca blanca</i>	95
5.2.3 <i>Análisis mediciones suelo contaminado</i>	98
5.3 Análisis de mediciones del suelo contaminado	99
5.3.1 <i>Cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon</i>	100
5.3.2 <i>Cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon</i>	103
5.3.3 <i>Cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon</i>	106
5.3.4 <i>Cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon</i>	108
5.4 Cuarta medición en la muestra de suelo contaminado	111
5.4.1 <i>Cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon</i>	111
5.4.2 <i>Cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon</i>	114
5.4.3 <i>Cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon</i>	116
5.4.4 <i>Cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon</i>	118
<b>6. ANÁLISIS REMOCIÓN DE MERCURIO MEDIANTE MANIHOT ESCULENTA</b>	<b>124</b>

<b>7. DISEÑO DE EXPERIMENTOS</b>	<b>128</b>
7.1 Carbón activado	130
7.2 Matriz de decisión	131
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>135</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>137</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>150</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>152</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Número atómico del mercurio	32
<b>Figura 2.</b> Ficha internacional de seguridad del mercurio	33
<b>Figura 3.</b> Equipo XRF portátil	36
<b>Figura 4.</b> Medición realizada del mercurio	37
<b>Figura 5.</b> Obtención de oro	38
<b>Figura 6.</b> Relave de presa	40
<b>Figura 7.</b> Relave de depósito	41
<b>Figura 8.</b> Mapa Colombia Yalí Antioquia	44
<b>Figura 9.</b> Temperatura promedio de Yalí	45
<b>Figura 10.</b> Humedad promedio de Yalí	45
<b>Figura 11.</b> Triangulo de textura de suelo	48
<b>Figura 12.</b> Muestra del suelo del relave minero	49
<b>Figura 13.</b> Muestra del suelo relave minero	49
<b>Figura 14.</b> Solución dicromato de potasio	52
<b>Figura 15.</b> Solución sulfato ferroso	52
<b>Figura 16.</b> Solución sulfato ferroso a 100 mL	53
<b>Figura 17.</b> Solución de sulfato ferroso	56
<b>Figura 18.</b> Solución de sulfato ferroso titulado	56
<b>Figura 19.</b> Titulación de la solución sulfato ferroso	57
<b>Figura 20.</b> Solución de sulfato ferroso a 20 mL	57
<b>Figura 21.</b> Solución de sulfato ferroso a 100 mL	58
<b>Figura 22.</b> Solución de sulfato ferroso	58
<b>Figura 23.</b> Espectrofotómetro	59
<b>Figura 24.</b> Soluciones de sulfato ferroso a diferentes concentraciones	60
<b>Figura 25.</b> Resultados de las curvas adsorción	61
<b>Figura 26.</b> Reacción ácido cianhídrico	61
<b>Figura 27.</b> Estructura Linamarina	62
<b>Figura 28.</b> Ruta biocinética Linamarina	63

<b>Figura 29.</b> Metabolismo del cianuro	63
<b>Figura 30.</b> Estructura Amilosa	65
<b>Figura 31.</b> Estructura Amilopectina	69
<b>Figura 32.</b> Planta Manihot esculenta	70
<b>Figura 33.</b> Planta Manihot esculenta	71
<b>Figura 34.</b> Cáscara de yuca amarga	72
<b>Figura 35.</b> Cáscara de yuca amarga	73
<b>Figura 36.</b> Cáscara de yuca dulce	73
<b>Figura 37.</b> Cáscara de yuca dulce	80
<b>Figura 38.</b> Actividad agrícola yuca	80
<b>Figura 39.</b> Muestra del suelo	80
<b>Figura 40.</b> Promedio de mercurio en la primera medición	80
<b>Figura 41.</b> Promedio de las concentraciones en la segunda medición	81
<b>Figura 42.</b> Promedio del mercurio segunda medición	81
<b>Figura 43.</b> Comparación de promedios	82
<b>Figura 44.</b> Promedio de concentraciones del mercurio	84
<b>Figura 45.</b> Promedio de concentraciones del mercurio	89
<b>Figura 46.</b> Promedio de las concentraciones del mercurio	95
<b>Figura 47.</b> Promedio de concentraciones de mercurio	98
<b>Figura 48.</b> Promedio concentración de mercurio con cáscara de amarilla y 50 g biocarbon	99
<b>Figura 49.</b> Promedio de las tres mediciones	102
<b>Figura 50.</b> Promedio de concentraciones de mercurio	105
<b>Figura 51.</b> Promedio de concentraciones de mercurio	108
<b>Figura 52.</b> Concentraciones de mercurio de la cuarta medición	110
<b>Figura 53.</b> Concentraciones de mercurio	113
<b>Figura 54.</b> Muestra de suelo del relave minero	115
<b>Figura 55.</b> Representación gráfica del biocarbon	118
<b>Figura 56.</b> Concentración de mercurio del relave minero	121
<b>Figura 57.</b> Mediciones de concentración de mercurio	122
<b>Figura 58.</b> Mediciones de concentración de mercurio	123

<b>Figura 59.</b> Remoción de mercurio y cáscara de yuca y biocarbon 50 g	126
<b>Figura 60.</b> Remoción de mercurio y cáscara de yuca y biocarbon 100 g	127
<b>Figura 61.</b> Remoción de mercurio y cáscara de yuca y biocarbon 50 g	128
<b>Figura 62.</b> Remoción de mercurio y cáscara de yuca y biocarbon 100 g	129
<b>Figura 63.</b> Mediciones de concentración de mercurio	129
<b>Figura 64.</b> Remoción de mercurio cascara de yuca y biocarbon 50 g	130
<b>Figura 65.</b> Remoción de mercurio cascara de yuca y biocarbon 100 g	131
<b>Figura 66.</b> Remoción de mercurio cascara de yuca y biocarbon 50 g	133
<b>Figura 67.</b> Remoción de mercurio cascara de yuca y biocarbon 100 g	134

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Toxicidad de los metales pesados	31
<b>Tabla 2.</b> Textura del suelo según el tamaño	48
<b>Tabla 3.</b> Concentraciones metales pesados en el suelo	50
<b>Tabla 4.</b> Toma de curva de absorbancia	54
<b>Tabla 5.</b> Toma de curva de absorbancia con diferentes concentraciones	62
<b>Tabla 6.</b> Clasificación científica <i>Manihot esculenta</i>	64
<b>Tabla 7.</b> Propiedades de la Amilosa y la Amilopectina	67
<b>Tabla 8.</b> Zonas productoras <i>Manihot esculenta</i>	74
<b>Tabla 9.</b> Primera medición muestra del relave	78
<b>Tabla 10.</b> Segunda medición muestra del relave	87
<b>Tabla 11.</b> Tercera medición muestra del relave	87
<b>Tabla 12.</b> Cuarta medición muestra del relave	88
<b>Tabla 13.</b> Promedio de las cuatro mediciones del relave	88
<b>Tabla 14.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de yuca amarilla	90
<b>Tabla 15.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de yuca amarilla	91
<b>Tabla 16.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de yuca amarilla	92
<b>Tabla 17.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca Amarilla	93
<b>Tabla 18.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de blanca	94
<b>Tabla 19.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de yuca blanca	96
<b>Tabla 20.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de yuca blanca	96
<b>Tabla 21.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca Blanca	97
<b>Tabla 22.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 50 g biocarbon	97
<b>Tabla 23.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de amarilla 50 g biocarbon	100
<b>Tabla 24.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 50 g biocarbon	101
<b>Tabla 25.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca amarilla y biocarbon 50 g	101
<b>Tabla 26.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 100 g biocarbon	101

<b>Tabla 27.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de amarilla 100 g biocarbon	103
<b>Tabla 28.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 100 g biocarbon	103
<b>Tabla 29.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca amarilla y biocarbon 100 g	104
<b>Tabla 30.</b> Promedio obtenido para la cáscara de yuca amarilla con 50 y 100 g de biocarbon	104
<b>Tabla 31.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de blanca 50 g biocarbon	105
<b>Tabla 32.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de blanca 50 g biocarbon	106
<b>Tabla 33.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de blanca 50 g biocarbon	106
<b>Tabla 34.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca blanca y biocarbon 50 g	107
<b>Tabla 35.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de blanca 100 g biocarbon	107
<b>Tabla 36.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de blanca 100 g Biocarbon	108
<b>Tabla 37.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de blanca 100 g biocarbon	109
<b>Tabla 38.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca blanca y biocarbon 100 g	109
<b>Tabla 39.</b> Promedio obtenido de la tercera medición con 50 y 100 g de biocarbon	110
<b>Tabla 40.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 50 g biocarbon	111
<b>Tabla 41.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de amarilla 50 g biocarbon	111
<b>Tabla 42.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 50 g biocarbon	112
<b>Tabla 43.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca amarilla y biocarbon 50 g	112
<b>Tabla 44.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 100 g biocarbon	113

<b>Tabla 45.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de amarilla 100 g biocarbon	114
<b>Tabla 46.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de amarilla 100 g biocarbon	114
<b>Tabla 47.</b> Promedio de las tres mediciones muestra del relave y cáscara de yuca amarilla y biocarbon 100 g	115
<b>Tabla 48.</b> Promedio obtenido para la cuarta medición de cáscara de yuca amarilla con 50 y 100 g de biocarbon	116
<b>Tabla 49.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de blanca 50 g biocarbon	116
<b>Tabla 50.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de blanca 50 g biocarbon	117
<b>Tabla 51.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de blanca 50 g biocarbon	117
<b>Tabla 52.</b> Promedio de las tres mediciones de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon	118
<b>Tabla 53.</b> Primera medición muestra del relave y cáscara de blanca 100 g biocarbon	119
<b>Tabla 54.</b> Segunda medición muestra del relave y cáscara de blanca 100 g biocarbon	119
<b>Tabla 55.</b> Tercera medición muestra del relave y cáscara de blanca 100 g biocarbon	120
<b>Tabla 56.</b> Promedio de las tres mediciones de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon	120
<b>Tabla 57.</b> Promedio obtenido para la cuarta medición de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon	121
<b>Tabla 58.</b> Número de mediciones realizadas para la remediación de mercurio mediante la cáscara de yuca amarilla	122
<b>Tabla 59.</b> Número de mediciones realizadas para la remediación de mercurio mediante la cáscara de yuca blanca	123
<b>Tabla 60.</b> Diseño de experimentos	132

## RESUMEN

Este proyecto se desarrolla por la necesidad de disminuir los niveles de metales que absorbe el suelo luego del proceso de extracción minera. La minera es una de las principales actividades que promueven la economía de los países, debido a que la minería disminuye el desempleo y a su vez permite que los ingresos sean equitativos para la población, adicionalmente, nos permite la innovación de recursos que permiten el desarrollo, esto se debe a que la actividad minera se encuentra presente en toda la cadena alimenticia, es por ello, que al aumentar el desarrollo minero, otros sectores se ven beneficiados y permiten el incremento de los ingresos de dicho país, sin embargo, para que esto ocurra es fundamental que la actividad sea regulada, esto con el fin de que al momento de realizar cualquier tipo de extracción los impactos que este proceso pueda generar al medio ambiente o a la salud de los seres vivos sean menores.

Por lo anteriormente mencionado, se presenta la propuesta de remediación de mercurio con la cáscara *Manihot esculenta* en suelos afectados por la contaminación minera en Colombia. Para ello se plantea un esquema de remediación con dos tipos de cáscara de yuca, dulce y amarga, con el fin de comprobar la eficiencia de la adsorción con respecto a la afinidad iónica del mercurio. Posteriormente, en el transcurso del inicio del proyecto se realizaron diferentes mediciones con el equipo XRF para hallar la concentración (ppm) del mercurio en la muestra de suelo. Por lo cual, se evidencio una disminución significativa del suelo contaminado, llevando a cabo el cumplimiento de la propuesta inicial del proyecto.

**Palabras clave:** mercurio, cáscara, remediación, minería, *Manihot esculenta*.

## INTRODUCCIÓN

La minería en Colombia es una problemática a nivel ambiental, social y económica que azota a los territorios colombianos. Por la falta de regularidades de las entidades gubernamentales en el proceso de la exploración minera, se presentan una serie de consecuencias; tales como, la deforestación en bosques, la contaminación de suelos por el vertimiento de metales pesados, como lo son, el mercurio, el cadmio, el plomo, el arsénico, entre otros, “ocasionando acidificación en el pH de la tierra y así mismo destruyendo minerales vitales para el suelo y consecuentemente afectando la fauna generando ciertas alteraciones por la biomagnificación de metilmercurio en las cadenas tróficas”[14].

Por otro lado, esos vertimientos, ocasionan la contaminación de zonas fluviales, en especial por la presencia del mercurio, en el cual, un solo gramo de mercurio contamina 500 mil litros de agua [15]. Por ende, los residuos de mercurio afectan a las comunidades que residen en dichos territorios, en donde, presentan síntomas de intoxicación propiciando enfermedades pulmonares, renales, afectaciones al sistema nervioso y demás [16].

Recientemente, se han realizado diferentes técnicas para la remoción de metales pesados en suelos y aguas, como, por ejemplo, por medio de la precipitación, intercambio iónico, filtración, tratamiento electroquímico, rizo filtración, fitorremediación, entre otros [17]. En los cuales, su eficiencia de remoción ha sido certera para la recuperación de suelos y aguas, teniendo en cuenta sus correspondientes tecnologías para lograr su objetivo.

Por lo anterior, en el presente documento se plantea la propuesta de la técnica de remoción por medio de la cáscara *Manihot esculenta* para la remoción del mercurio en una muestra de suelo de oleos mineros desde el municipio Yalí Antioquia, Colombia. En el cual, se realizará una caracterización de la muestra de suelo y así mismo efectuar un diseño de experimento para determinar el nivel de remoción de concentración del

mercurio.

Para la ejecución del proyecto, inicialmente se tiene en cuenta los componentes de la muestra de oleo minero del municipio de Yalí, en donde, se pretende determinar las consecuencias perjudiciales que conllevan sus residuos en aspectos de salubridad y ambiental, posteriormente se realiza la caracterización de la *Manihot esculenta* para analizar la eficiencia de remoción del mercurio en condiciones estándar, en donde, se plantea un modelo de experimentos de tres plantas pilotos para evaluar la concentración removida según el tamaño de la cáscara y la procedencia del tubérculo. Finalmente, una vez adquiridos los resultados se proyecta el estudio estadístico y analítico de una posible solución sostenible para implementación en municipios que hoy en día continúan viviendo las consecuencias de la contaminación por oleos mineros en Colombia.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Proponer un esquema de remediación en suelos afectados por el sector minero en Yalí, Antioquia.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar una muestra de suelo de Yalí Antioquia afectada por actividad minera
- Caracterizar fisicoquímicamente la cáscara *Manihot esculenta*
- Proponer un arreglo de remediación de acuerdo con el diseño experimental trabajado
- Evaluar la remoción de mercurio en la muestra seleccionada mediante la medición del equipo XRF

## **1. GENERALIDADES Y MARCO CONCEPTUAL**

En el presente capítulo se expone el marco conceptual y las generalidades de la propuesta de investigación. Identificando la problemática ambiental que los relaves mineros generan en los territorios y por ende afecta a las comunidades que viven allí. La justificación del presente trabajo se basa en el estudio de la remoción del mercurio en suelos contaminados por relaves mineros por medio de la cáscara *Manihot esculenta* por sus propiedades físico – mecánicas, en donde, anteriormente han sido evaluadas y analizadas en el sector investigativo.

### **1.1 Identificación del problema**

La contaminación ambiental de suelos y aguas en Colombia es el derivado del mal uso de los residuos por metales pesados en la explotación minera, tales como, uranio, cadmio, plomo, níquel, cinc, entre otros metales pesados. Dichos metales afectan y contaminan los suelos para que vuelvan a ser fértiles y sobre todo las aguas para el consumo humano y animal, convirtiéndose en mediano y largo plazo en un problema de salubridad pública y ambiental.

Colombia por sus características geográficas es apto para la explotación de todo tipo de recursos, entre ellos de metales preciosos como el oro. La ubicación geográfica es llamativa para los grandes inversionistas mundiales que encuentran la oportunidad, sin mayores exigencias, incluso, con la anuencia de autoridades locales y nacionales. El impacto ambiental sobre bosques y fuentes hídricas que ha surgido, entre otros, con la explotación de las minas de carbón en el Cerrejón – Guajira, la tala de árboles maderables en el Chocó, las minas de carbón en el Departamento del Cesar, la explotación continua de esmeraldas en Boyacá, los pozos petroleros en la región de la Orinoquia, entre otros.

<<Tan solo en el año 1993, se expidió la Ley 99 o Ley Ambiental, la cual creó el Ministerio de Ambiente, como órgano rector de la política ambiental. En ella se incluyó además el término “SOSTENIBLE”, como pilar fundamental para dar vía libre a la explotación de los

recursos no renovables. Se incluyó además que previo a autorizar la explotación de recursos, se exija la expedición de las licencias ambientales, con el propósito de prevenir, mitigar, manejar, corregir y compensar los efectos ambientales. Dichos principios no se han hecho cumplir, por el contrario, ha sido un efecto que ha contribuido al deterioro ambiental, cada vez más visible. Los afectados y algunas autoridades judiciales se han pronunciado para dirimir conflictos, como ha sido el caso específico en el que la Corte Constitucional, en sentencia T-622/16, otorgó derechos fundamentales al Río Atrato>> [18], allí analizó el impacto directo sobre la salud de las personas y sobre la disminución de productos de bosque que afectan el balance alimentario y medicinal como consecuencia de las actividades contaminantes producidas por la explotación minera ilegal. De otra parte, en publicación que hiciera el sitio Ñongaba [19], advierte que “El 66 % de la minería aluvial de oro en Colombia es ilegal”, empleando para la explotación de minerales, metales pesados, como el mercurio, plomo, cadmio, estroncio, entre otros, altos contaminantes ambientales en aguas y suelos y por ende perjudicial para la salud humana.

Así mismo, la minería legal, también trae impactos negativos, como se establece en el documento elaborado por INDEPAZ, en el análisis que se hiciera a “La mega minería en el páramo de Santurbán” [20]. El contrato de concesión otorgado, fue para la intervención directa sobre 167 hectáreas, cuya galería de la mina tendría una extensión de dos kilómetros por 760 metros de altura, equivalente a un edificio de 260 pisos, cuyos volúmenes de aguas subterráneas que se filtraban por la mina y los túneles, que irrumpen su dinámica y genera disturbios irreversibles: 224 Litros/segundo Volúmenes de agua que entran en contacto con rocas sulfurizadas, que generan aguas ácidas y luego arrastran metales pesados y otros químicos tóxicos y contaminantes. Las anteriores experiencias no han representado SOSTENIBILIDAD del ambiente, por el contrario, han sido situaciones en donde cada vez más, las personas y las zonas de explotación se han visto afectadas por el deterioro y la pobreza.

## 1.2 Justificación del proyecto

Este proyecto se va a encargar de reducir el impacto ambiental que genera la industria minera, a pesar de que esta industria trae beneficios a la sociedad, los impactos negativos que se generan en el proceso son graves y en muchos de los casos irreversibles. Algunos de esos impactos son degradación en la corteza terrestre, suelos y daños en los ecosistemas, en algunos ámbitos. La contaminación se genera por el mal uso de los residuos que se producen a lo largo de la producción en la industria, entre otros factores, en el caso de la minería, los residuos que generan mayor impacto ambiental son los metales pesados que deja la explotación minera, entre esos metales se encuentran uranio, cadmio, plomo, níquel, cinc y otros; la manera en que esos metales afectan el medio ambiente, es por medio de la contaminación de suelos y el agua, el suelo reduce su capacidad de fertilidad y el agua deja de ser apta para el consumo humano y animal, esto a mediano y largo plazo se convierte en un problema de salubridad pública y ambiental.

Por lo anterior, se presenta la propuesta de la remoción de metales pesados por medio de la cascara de la *Manihot esculenta* de origen de Fonseca Guajira, Colombia. Las cuales se dará uso de dos tipos de yucas, yuca dulce (amarilla) y dulce amarga (blanca). Se ha evidenciado diferentes estudios la eficiencia de la *Manihot esculenta* en la remoción de diferentes metales pesados y así mismo brinda la recuperación de suelos y aguas.

De la misma forma, como ingenieras químicas debemos tener un panorama es los aspectos económicos, sociales y ambientales de lo que esta problemática conlleva para los territorios colombianos. Ya que se presenta en el proyecto una posible solución sostenible para la recuperación de suelos, reduciendo así el impacto ambiental.

### **1.3 Antecedentes**

Para la sustentación del presente trabajo, se tuvo en cuenta los siguientes estudios de rizo filtración y fitorremediación por contaminación de metales pesados entre ellos el mercurio. Se brindan información de las hectáreas contaminadas por sus elementos químicos nocivos y así mismo como y en cuanto tiempo fue su recuperación.

**Evaluation of cadmium and arsenic effects on wild and cultivated cardoon genotypes selected for metal phytoremediation and bioenergy purposes. Environmental Science and Pollution Research volume 28, pages 55102–55115 (2021)**

Este artículo nos brinda información de uno de nuestros objetivos principales de cómo por medio de la fitorremediación es posible absorber algunos metales pesados y la resultante de la planta (biomasa) es posible utilizarla para la producción de energía. Se determinó la concentración del cadmio y arsénico para la reutilización de dichos metales para la producción de energía.

**Microbe- plant interaction as a sustainable tool for mopping up heavy metal contaminated sites. BMC Microbiology volume 22, Article number: 174 (2022)**

El presente artículo detalla cómo con el trabajo conjunto con microorganismos es más eficiente la absorción de los metales pesados. En especial hace referencia a las bacterias, en especial el bacilo *Pseudomonas* y *Bacillus* (aeróbicos estrictos, aunque en algunos casos pueden utilizar el nitrato como aceptor de electrones). La planta utilizada para la rizofiltración fue el girasol o también denominada *Helianthus annuus*.

**Invasive plants as biosorbents for environmental remediation: a review. Environmental Chemistry Letters volume 20, pages 1421–1451 (2022).**

Este artículo nos muestra cifras porcentuales de cómo por medio de plantas invasoras se pudo recuperar entre el 90 – 99% de soluciones acuosas por la contaminación de diferentes metales pesados. A su vez, este fenómeno a nivel económico fue un beneficio

para el gobierno estadounidense, ya que, al ver la eficiencia de las descontaminaciones de estas soluciones pudo ser una solución sostenible.

**Proof-of-concept of polymetallic phyto-extraction of base metal mine tailings from Queensland, Australia. Plant and Soil (2022)**

Este artículo brinda la información de cómo en relaves mineros promueve la contaminación de suelos y aguas por la separación del oro de las rocas. Por medio de la fitorremediación, este artículo promueve la información de la eficiencia de la absorción de la fitoextracción polimetálica de metales básicos.

**Sunflower Seedlings Hyperaccumulate Selenium. Acta Biologica Hungarica volume 69, pages 197–209 (2018)**

El presente artículo presenta la funcionalidad del girasol y el maíz por la absorción del selenito de sodio. Sin embargo, en el artículo muestra las deformaciones que obtuvo el maíz por la absorción de esta sal con una determinada concentración. En el maíz aumentó en sus raíces y brotes con una concentración de selenito de sodio de (1 - 90 mg kg<sup>-1</sup> suelo) mientras que, el girasol obtuvo unos cambios en sus raíces, ya que, disminuye el crecimiento con una concentración de (1 - 30 mg kg<sup>-1</sup> suelo) de selenato de sodio. Se concluye que el selenito de sodio promueve aumento en brotes y las raíces tanto del girasol como del maíz, mientras que, el selenito de sodio disminuye el crecimiento de las raíces en el girasol.

**Evaluación de un proceso de fitorremediación en suelo proveniente del municipio de Guamal, Meta, contaminado por desechos de fluidos de perforación base agua con altos contenidos de metales pesados. Fundación Universidad de América (1-Feb- 2022)**

El anterior artículo presenta una escala a laboratorio de biorremediación enfocado en los metales cadmio y cromo. Se desarrolló con muestras de suelos de Guamal, Meta por

medio de la fitorremediación. Para ello empleó el uso de Bentonita la cual cumple la función de encapsular los metales pesados, más, sin embargo, no se obtuvo una cifra significativa en el que el método de la fitorremediación haya realizado un método de remoción en los suelos. Se realizó con bajo concentraciones de cadmio de P1.1: 0.01 ppm y valores para el cromo de P1.1: 0.01ppm.

**汞污染生物修复研究进展[J]. 资料来源：外交部科技局. Avances en la investigación sobre la biorremediación de la contaminación por mercurio. Fuente: Oficina de Asuntos Exteriores de Ciencia y Tecnología**

El anterior artículo nos brinda información sobre el tubérculo *Manihot esculenta*, también denominada yuca. En China se han realizado estudios de la remediación del mercurio con la siembra de yuca, ya que, por su composición de almidón ayuda a la absorción de metales pesados. Además de ello, se evidencia como puede ser útil como biomasa para la producción de etanol combustible. También se identifica que, con la aplicación de compost y KI mejora la eficiencia de la remediación de la contaminación por mercurio.

**Manihot esculenta or cassava is the only member of the family cultivated for food (Patil and Fauquet, 2009). From: Applied Plant Genomics and Biotechnology, 2015**

El anterior artículo nos presenta los fundamentos de ingeniería de biotecnología como base fundamental la yuca. El almidón que contiene la yuca puede lograr ser una materia prima eficiente para la biorrefinería. En especial, se realiza dicho estudio para la producción de combustibles, productos químicos y productos para la industria química.

**重金属镉在木薯中的积累及其生长的影响. Acumulación de cadmio de metales pesados en la yuca y sus efectos en su crecimiento. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2011.35.014**

El presente artículo, se basa en las malformaciones que obtiene la yuca al absorber cadmio. Se evidencia que afecta en su crecimiento, el diámetro del tallo, el índice de área

foliar y el peso de la raíz de la yuca disminuyendo en diversos grados. Con una concentración de cadmio del 30 mg/kg absorbe una alta composición de toxicidad.

**Phytoextraction potential of *Manihot esculenta* Crantz. (cassava) grown in mercury- and gold- containing biosolids and mine tailings. Hannah Joy P.Alcantara Augustine I.Doroni aSpas D.Kolev**

El siguiente escrito es el estudio de la siembra de yuca en relaves mineros, específicamente en la mina de oro Stawell Victoria, Australia. con una humedad de 60 - 70%. Según las estadísticas basadas en el estudio, se evidencia que es factible la siembra de yuca en relaves mineros con biosólidos que contienen mercurio y oro. Con un 75% de plantas cultivadas en sustratos de relaves de la mina el 75% resultó ser prometedoras con su crecimiento de la raíz.

**Using bioenergy crop cassava (*Manihot esculenta*) for reclamation of heavily metalcontaminated land. International Journal of Phytoremediation Volume 22, Issue 12, Pages 1313 - 132014 October 2020**

El presente trabajo, contiene información sobre la sostenibilidad de la yuca como una biomasa bioenergética. Con base al estudio realizado se determinaron las condiciones óptimas para un crecimiento favorable 23.13 -- 26.22 t ha<sup>-1</sup>, el cual podría producir considerablemente 3680 – 4160 L ha<sup>-1</sup> bioetanol. La fertilidad y la acidez del suelo mejora después de la plantación de la yuca.

**Localization of mercury and gold in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Environmental Science and Pollution Research volume 27, pages 18498–18509 (2020)**

El siguiente artículo presenta el potencial que tiene la yuca para la fito-extracción de mercurio y oro. Se demuestra como la absorción de las raíces contienen 50 y 100 μmol L<sup>-1</sup> de Au y 50 o 100 1μmol L<sup>-1</sup> Soluciones de Hg, los dos metales fueron localizados

en la epidermis. Las plantas están expuestas a metales, lo que sugiere que la linarina podría estar involucrada en la absorción y distribución de Hg y Au.

**Carlos David Grande Tovar & Lady Laura Del Rio Osorio. (2020). Valorización de residuos industriales en la producción de almidón de yuca. Prospectiva, 19(2), 3. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7997610.pdf>**

En el presente artículo se expone el potencial que tiene la yuca para la remoción de metales pesados gracias a su cáscara, el bagazo y efluentes industriales, ya que, con sus propiedades fisicoquímicas son aptas para la remoción (bioabsorbentes) de metales pesados y así mismo se pueden convertir en residuos biodegradables.

**Omosho, O. A. & Sangodoyin, A. Y. (2013). Production and utilization of cassava peel activated carbon in treatment of effluent from cassava processing industry. Water Practice and Technology, 8(2), 215-224.**

El siguiente artículo trata de la capacidad de la remoción de los residuos de la yuca para la remoción de contaminantes pesados en las aguas residuales. Este proceso de remoción fue mediante un proceso de oxidación con peróxido con el agente de adsorción del carbón activado a diferentes escalas de activación.

#### **1.4 Relaves mineros**

“Los relaves mineros son un conjunto de residuos de un proceso de recuperación de metales pesados y minerales Existen diferentes tipos de relaves, como, por ejemplo; tranque de relave, embalse de relave, relave espesado, relave filtrado, relave en pasta” [21]. Pero en este caso de la muestra de suelo del que se va a realizar el proceso de investigación procede de un relave minero de roca del municipio de Yalí Antioquia, Colombia.

Realizando el respectivo muestreo de metales pesados en la muestra de suelo, se lo gro

identificar diferentes metales, tales como; plomo, mercurio, cinc, titanio, hierro, cobre, arsénico, rubidio, estroncio, circonio con sus concentraciones respectivas (ppm) debido a la actividad minera desarrollada en el relave minero. La presencia de estos metales es debido a las técnicas tradicionales de explotación minera, que en este caso es el método por la exploración artesanal.

La minería artesanal y de pequeña escala (MAPE) hace referencia la exploración de suelos para el hallazgo de ciertos minerales, en donde, se da poco uso de tecnología y maquinarias para la obtención de ciertos metales como por ejemplo el oro. Una de las características principales de la minería artesanal es que en sectores relativamente pequeños o diseñados por aluvión de materiales con tal que de la exploración minera sea aún mayor, por ende, dichas prácticas no tienen la vigilancia y seguridad adecuada ya que usualmente son actividades ilegales por los aspectos ambientales, sociales y salubridad [22].

En este caso, el enfoque de la minería artesanal en el municipio de Yalí Antioquia según las estadísticas del SIMCO (Sistema de Información Minero Colombiano) se extrae 1.861 gramos de minerales (en especial de oro) desde el último semestre del año de 2022 [23]. En donde, es una actividad principal para el municipio como una vía económica.

### **1.5 Metales pesados**

Los metales pesados son elementos que se encuentran en la corteza de la tierra y tienen ese nombre o están catalogados porque su peso atómico está dentro de un rango mínimo de 63 como lo es el cobre y a 200 que es el mercurio, por otra parte, también se puede catalogar por sus densidades siendo el mínimo de 4 g/cm<sup>3</sup> a 7 g/cm<sup>3</sup> y finalmente, por su número atómico. Una característica principal de los metales es que no se puede degradar ya que son compuestos que se acumulan y además de ello se tiende a biomagnificarse [24].

Uno de los metales pesados encontrados en la muestra del suelo contaminado por relaves mineros es aquellos que se muestran a continuación:

**Tabla 1.***Toxicidad de los metales pesados.*

Metal	Sub fijo	Toxicidad	Referencia
<b>Titanio</b>	<b>Ti</b>	La inhalación del polvo puede causar tirantez y dolor en el pecho, tos, y dificultad para respirar, también el contacto con la piel y los ojos puede generar irritación en las vías de entrada: Inhalación, contacto con la piel, contacto con los ojos	[25]
<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	El hierro es tóxico para el aparato digestivo, el aparato cardiovascular y el sistema nervioso central, la abundancia de hierro se ve en procesos enzimáticos e interfiere con la fosforilación oxidativa, lo que provoca acidosis metabólica	[26]
<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	Puede causar cáncer y lesiones cutáneas. También se ha asociado a enfermedades cardiovasculares y diabetes.	[27]
<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	Provoca quemaduras térmicas en los ojos y piel se da señales y síntomas de sobreexposición que generan quemaduras en piel y ojos.	[28]
<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	No se han encontrado estadísticas exactas de efectos colaterales en el cuerpo humano, sin embargo, el estudio más cercano es que se evidencia que una alta dosis puede provocar cáncer en la sangre.	[29]
<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	Se ha comprobado a la fecha de hoy que puede provocar ciertas alergias y/o inflamaciones.	[30]

*Nota.* Toxicidad de los metales pesados.**Tabla 1.***(Continuidad).*

<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	Puede producir daño cerebral, daños renales, daño en los pulmones, problemas del sistema digestivo, entre otros.	[31]
<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	El plomo ataca el cerebro y el sistema nervioso central, lo que provoca coma, convulsiones e incluso la muerte.	[32]

*Nota.* Toxicidad de los metales pesados.

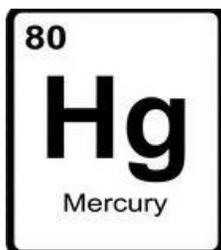
### 1.5.1 Mercurio

El mercurio es un metal de apariencia metálica en estado líquido si se encuentra en el

medio ambiente, se cataloga como un metal pesado representado por el símbolo Hg, su punto de ebullición es de 357 °C, con una masa atómica de 200,59, con una densidad de 13534 kg/m<sup>3</sup>, tiene tres estados de oxidación (1, 2 y 4), se caracteriza por tener una buena conductividad [33].

**Figura 1.**

*Número atómico del mercurio.*



**Nota.** En la figura se evidencia el número atómico del mercurio. Tomado de: Oleksandr, B. Hermosas Ilustraciones Abstractas Del Elemento Mercury: ilustración de stock 2205096059. Shutterstock.

El mercurio cuando está en estado líquido tiene un valor de 484 dinas/cm eso quiere decir que no puedo mojar alguna superficie con la que este en contacto [34]. El mercurio es bivalente solo se junta con dos átomos, por consecuente tiene diferentes estados de oxidación, sin embargo, el mercurio se disuelve en elemento inorgánicos y acido orgánicos [35].

**Figura 2.**

*Ficha internacional técnica de seguridad del mercurio.*

TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	No combustible. En caso de incendio se desprenden humos (o gases) tóxicos e irritantes.	NO poner en contacto con sustancias inflamables.	En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
<b>EXPLOSION</b>	Riesgo de incendio y explosión en contacto con sustancias incompatibles (véanse Peligros químicos).		En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
<b>EXPOSICION</b>		¡HIGIENE ESTRICTA! ¡EVITAR LA EXPOSICION DE MUJERES (EMBARAZADAS)! ¡EVITAR LA EXPOSICION DE ADOLESCENTES Y NIÑOS!	¡CONSULTAR AL MEDICO EN TODOS LOS CASOS!
• <b>INHALACION</b>	Dolor abdominal, tos, diarrea, jadeo, vómitos.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.
• <b>PIEL</b>	¡PUEDA ABSORBERSE!	Guantes protectores y traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón y proporcionar asistencia médica.
• <b>OJOS</b>		Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• <b>INGESTION</b>		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo. Lavarse las manos antes de comer.	Proporcionar asistencia médica.

**Nota.** En la imagen se observan los riesgos y precauciones que se deben tener frente al mercurio. Tomado de: Mercurio Ficha internacional de seguridad química. (2013, 15 agosto). Health Care Without Harm

Como se mencionó anteriormente uno de los metales encontrados en la muestra de suelo del relave minero, se halló el mercurio. El mercurio es utilizado usualmente en la exploración minera artesanal para poder separar el oro hallado en algunos minerales como por ejemplo en rocas. El oro que se encuentra adherido en las rocas tiene una gran dificultad para extraerse por ello, se utiliza ciertas metodologías tradicionales para lograr separar el oro de la roca, una de esas aplicaciones es la utilidad del mercurio. Además de ello, en Colombia la comercialización ilegal es de gran accesibilidad por la falta de presencia del Estado para las regularidades del uso del mercurio.

El procedimiento para la separación del oro de las rocas con el uso del mercurio es la siguiente; cuando es hallado el oro se vierte el mercurio (líquido). La reacción al unir el mercurio con el oro forma una amalgama [36] la cual consiste en una mezcla entre el oro y el mercurio, ya que, el mercurio actúa “acaparando” donde entra en contacto con oro. Cuando ocurre dicha reacción, se evidencia una esfera cubierta completamente por mercurio, es decir, que el oro extraído se encuentra en el interior del metal del mercurio, esta “esfera” es de textura sólida. Por consecuencia es necesario realizar el proceso de fundición, una vez es fundido el metal ya finalmente queda el oro.

La contaminación del mercurio en la que se manifiesta en ASPECTOS AMBIENTALES es por dos vías, las cuales son las siguientes:

### **Contaminación atmosférica**

La contaminación atmosférica es cuando se presenta la amalgama, al evaporarse el mercurio (para quedar únicamente con el oro) se manifiesta el óxido de mercurio rumbo a la atmósfera. De esa manera se enlaza con la contaminación hídrica, la cual, hablaremos a continuación.

### **Contaminación hídrica**

<<Como mencionamos anteriormente, el mercurio evaporado (dirigió a la atmosfera), cuando llueve nuevamente el mercurio entra en contacto con suelos y además de ello con zonas acuíferas. El mercurio al entrar en contacto con las zonas hídricas del lugar entra de manera instantánea con bacterias anaerobias y aerobias ejecutando la metilación para formar el metilmercurio el cual es ingerido por algunos peces almacenando en sus tejidos grasos este componente, por consecuente esto afecta la cadena trófica, afectando la salud en animales y en humanos>> [37].

El mercurio aparte de ocasionar complicaciones ambientales también ocasiona complicaciones en salubridad, ya que, se ha encontrado estudios por la OMS (Organización Mundial de la Salud) que el mercurio es uno de los compuestos más tóxicos del mundo. La ingesta del mercurio es de gran peligro ya que el mercurio es un elemento acumulativo por esa razón se denomina toxico porque el cuerpo no lo puede eliminar. Las principales afectaciones que se presentan por la contaminación de mercurio es la afectación al sistema nervioso generando pérdida de memoria, temblores, dolores de cabeza. Del mismo modo, se encuentran alteraciones en el sistema digestivo, la piel, los riñones, los ojos, entre otros [38].

### **1.5.2 Plomo**

El plomo es catalogado como un metal pesado con un número atómico 82, con un estado de oxidación +2 y una electronegatividad de 1,9 con un radio atómico 1,75, el plomo consta de 207.19 masa atómica con una densidad de 11,4 g/ml, en donde, su punto de ebullición es de 1725 °C y su punto de fusión es de 327,4 °C, el plomo tiene un color gris metalizado [39].

El plomo es uno de los compuestos catalogados como uno de los elementos más tóxicos en el mundo y perjudiciales para el ambiente y para la salubridad. El plomo es muy utilizado en la industria, ya que, es de alto nivel para la resistencia de la corrosión [40]. “Normalmente el uso del plomo en la industria para la fabricación de tuberías, piezas y/o conductos, dentro de otras funciones, se emplea como embalses para el contacto de sustancias radioactivas y químicas peligrosas” [41]. “El plomo tiene una capacidad alta reactividad, en donde, es de buen uso para diferentes aleaciones, esto es porque hace posible el paso de partículas subatómicas, por ello es importante la utilización de resistencias en recipientes industriales” [42].

Por lo mencionado anteriormente, así mismo que el plomo proporciona diferentes utilidades industriales con una gran eficiencia es un componente altamente toxico a nivel ambiental y por ende de salubridad [43]. Según las estadísticas de la OMS (Organización Mundial de la Salud) “los niños pequeños son especialmente vulnerables a los efectos tóxicos del plomo, que puede tener consecuencias graves y permanentes en su salud y afectar en particular al desarrollo del cerebro y del sistema nervioso” [44] De igual manera, afecta la salud en adultos en el sistema nervioso o también en afectaciones renales.

Por otra parte, una de las principales afectaciones ambientales es por el empleo en la actividad minera. El plomo se evidencia en la contaminación de suelos y aguas. Esto afecta a la cadena trófica, en donde, al tener contacto con el hábitat de la fauna empieza acumularse en sus organismos [45]. En donde, su contaminación se clasifica por fuentes inorgánicas y fuentes orgánicas [46].

### 1.5.3 Analizador XRF portátil

Uno de los objetivos que se tiene para el presente proyecto es identificar la absorción de metales que tiene el suelo al estar en contacto con la cascara *Manihot esculenta*, por lo tanto, es necesario implementar un método fácil y que dé resultados confiables; en este caso, se implementó un equipo que se encarga de inspeccionar suelos, determinando y cuantificando los elementos contaminantes en la muestra.

**Figura 3.**

*Equipo analizador XRF portátil.*



**Nota.** El equipo analizador XRF portátil implementado para realizar las mediciones.

El analizador XRF, por sus siglas analizador de fluorescencia de rayos X, este equipo especializado en metales, nos permite medir la composición química de una muestra, logra medir elementos desde el magnesio hasta el uranio, al ser equipos portátiles, nos permite realizar mediciones in situ con resultados inmediatos [47].

Este equipo funciona por medio de rayos X, estos entran en contacto con la muestra generando emisiones de fluorescencia, la emisión rebota al equipo y en ese momento se aplica un cálculo matemático generando los resultados de la muestra [48].

Para realizar el análisis por medio de este equipo se debe seleccionar el tipo de muestra que se desea analizar, debido a que el equipo puede ser implementado en diversos métodos.

#### **Figura 4.**

*Medición realizada del mercurio.*



**Nota.** La figura 4 evidencia la primera medición realizada al relave minero.

## **1.6 MINERÍA EN COLOMBIA**

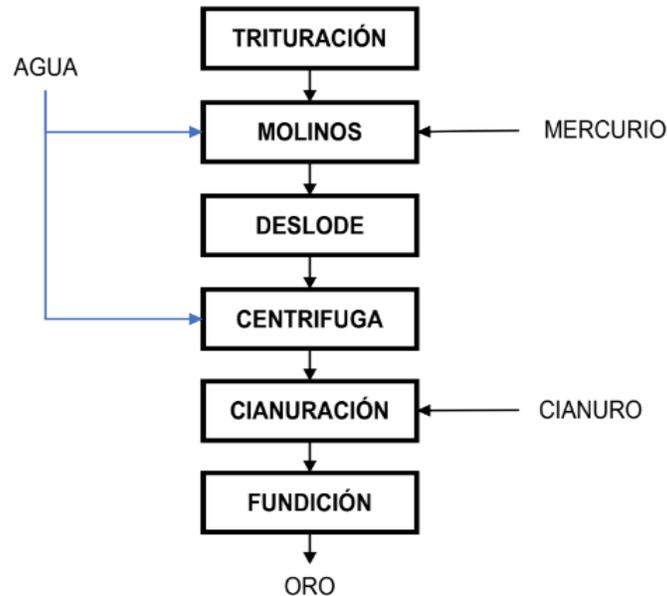
En este capítulo se demuestra cómo es el manejo de la minería en Colombia, ya que, existen diferentes métodos de obtención del oro y una de ellas es el empleo de sustancias tóxicas como lo es el mercurio. El cual es una metodología muy económica y eficiente para la separación del oro de una amalgama con otros metales. La distribución del mercurio en Colombia es legal, sin embargo, en el uso de la minería es prohibido por afectaciones de salubridad y ambientales.

### ***1.6.1 Minería en Antioquia***

En cuanto a la producción de Oro en Colombia, el primer departamento en implementarla fue Antioquia, a su vez representa más del 50% de la producción del país, esto se debe a la cadena de suministros que permite el proceso de obtención, sin embargo, el oro que se obtiene es por medio de mineros artesanales o minería a pequeña escala; los distritos mineros que tienen mayor participación en este proceso son Nordeste-bajo cauca y Puerto Nare [49].

**Figura 5.**

*Obtención de oro.*



**Nota.** Proceso obtención de oro. Tomada de: Manual de producción y consumo sostenible Gestión de recursos hídricos Minería de Oro.

Teniendo en cuenta la imagen 3, se observa que desde el inicio del proceso de obtención de oro adicionan mercurio, esto quiere decir que en cada una de las siguientes etapas se obtendrá como subproducto el mercurio.

### **1.6.2 Relaves mineros clasificación**

Los relaves son desechos o subproductos generados en el proceso de recuperación de minerales, este subproducto se genera cuando en el proceso de producción se realiza trituration y molienda, los relaves se extraen después de la molienda [50].

“Los relaves se clasifican por medio de la fase que presenten, en este caso puede ser solida o liquida, adicionalmente las características químicas y físicas nos permiten identificar el proceso adecuado para su tratamiento, transporte y disposición según lo indicado” [51].

### **Físicos [51]:**

- Evaporación.
- Separación por gravedad
- Centrifugado
- Filtrado

### **Químicos [49]:**

- Precipitación y preparación
- Neutralización
- Estabilización y solidificación
- Coagulación y floculación

Se clasifica como relaves convencionales, espesados, filtrados o en pasta, posteriormente, estos desechos o se almacenan en presas o depósitos:

## **DISPOSICIÓN DE RELAVES**

### **Presas de relaves [52]:**

- Concepción
- Planificación
- Operación
- Construcción en curso

### **Depósito de relaves [53]:**

- Diseño
- Construcción inicial

- Cierre
- Post cierre

### **Economía circular [54]:**

- Retro llenado de minas subterráneas
- Elaboración de bloques, postes y cemento
- Uso en material de construcción

### **PRESAS: Disposición de relaves convencionales**

Fase solida 20 – 40%

Espesados 60 – 65%

Las presas se construyen por medio de un muro de relaves previamente tratados, para poder implementarlo, es sometido a un tratamiento físico como el hidrociclonado y centrifugado, este muro y el suelo donde será depositado el residuo debe ser impermeabilizado esto con el fin de prevenir cualquier infiltración en la estabilidad de las fuente hídricas subterráneas, el agua que se obtiene como subproducto en este proceso de almacenamiento, se envía para un proceso de sedimentación y tratamiento con el fin de recircularla e implementarla.

#### **Figura 6.**

*Relave de presa.*



**Nota.** Relave de presa. Tomado de: [horizonteminero.com](http://horizonteminero.com)

Nuevamente en la operación o en el caso de verterla en otra fuente, hay que asegurar que el agua cumpla con los parámetros establecidos en la normatividad vigente [54].

DEPOSITOS: relaves con bajo contenido de húmedas, este proceso representa un menor riesgo en cuanto al manejo del residuo:

### **Espesados**

Ultra espesados 60 - 75%

Filtrados 80 – 100%

A diferencia del almacenamiento por presa, en este caso no es necesario implementar un tratamiento riguroso, debido a que la composición de los relaves en estos casos contiene bajo nivel de humedad, en este caso, el agua también pasa por los procesos de sedimentación tratamiento, en los depósitos, los residuos pasan por un proceso adicional de deshidratación de agua, esto permite disminuir el volumen de las áreas necesarias para el almacenamiento [54].

### **Figura 7.**

*Relave de depósito.*



**Nota.** Relave de depósito. Tomado de: Vale suspende depósito de relaves en mina Brucita. (2019, diciembre 3). Minería Pan-americana.

### **1.6.3 Problemáticas generadas por la minería**

Colombia implementa tres tipos, gran minería, mediana y minería artesanal, la gran minería, es controlada por grandes empresas lo cual permite un proceso más limpio y amigable con el medio ambiente, mientras que con los otros dos tipos de minería la extracción la realizan en rocas que contienen este elemento, el problema de esto es que implementan sustancias peligrosas como el mercurio, esto se realiza por medio de amalgamación y para obtener el oro puro someten la roca a un proceso en el cual el mercurio se evapora [54].

La contaminación generada por los residuos del sector minero es una problemática que cada día aumenta, el impacto negativo en los ecosistemas y en los seres vivos genera la necesidad de implementar métodos que ayuden a disminuir dicha problemática; existen diferentes tecnologías que ayudan a mitigar este impacto, algunas de estas tecnologías son:

**Precipitación química:** proceso en el cual se obtiene un sólido por medio de una disolución, este método se da gracias a una reacción química, el disolvente se evapora por su cambio de polaridad, se considera un método simple y a bajo costo, sin embargo, se generan residuos los cuales generan costos adicionales para su disposición [55].

**Membranas de filtración:** este método permite separa dos fases, en este caso tiene alta selectividad al momento de la separación, a pesar de ello, el mantenimiento que se debe realizar debido a los taponamientos en la membrana genera un alto costo [56].

**Electrodialisis:** se implementa energía que mueve los iones a través de una membrana de intercambios iónicos, en este caso, se considera un medio selectivo en el cual se elimina la sal de un flujo de alimentación en determinado flujo, el producto final obtiene un valor agregado, en este método se consume mucha energía, por lo cual, hace el proceso costoso [57].

#### **1.6.4 Convenio de Minamata**

El convenio de Minamata es uno de los primeros acuerdos realizados que giran en torno al medio ambiente, este convenio se negoció en el siglo XXI con el fin de priorizar la salud humana y como se mencionó, el medio ambiente de las emisiones del mercurio o los compuestos que puedan estar conformados por dicho metal. El mercurio es uno de los productos químicos que mayor preocupación causan a nivel mundial, esto se debe a la persistencia que este tiene en el ecosistema [58].

El mercurio afecta el sistema neurológico de los seres humanos generando consecuencias a largo plazo, este elemento logra bioacumularse en la cadena alimenticia, normalmente, se presenta contaminación en fuentes hídricas. Colombia y otros 91 países en octubre del 2013 se vincularon a dicho convenio, estableciendo su comercialización y uso en las diversas actividades industriales que presenta un país [59].

En el año 2013, Colombia en el convenio de Minamata incluyó la ley 1658 de 2013 en la cual se obliga a los países que cuentan con minería artesanal o minería a pequeña escala, implementar planes de acción Nacional que buscan formalizar los procesos mencionados, para que, de este modo, las emisiones y liberaciones de mercurio al medio ambiente se logren controlar y a su vez disminuir [59].

## 2. CARACTERIZACIÓN SUELO AFECTADO POR ACTIVIDAD MINERA EN YALÍ ANTIOQUIA

En el presente capítulo se establecen las propiedades físicas de la muestra del suelo, en donde, se tiene presente el aspecto del suelo, el pH, la materia orgánica que este contiene, el color, el olor, el grado de humedad que contiene el suelo a una temperatura estándar, entre otros.

### 2.1 Municipio de Yalí Antioquia, Colombia

Yalí se encuentra ubicado al Nordeste de Antioquia, también conocido como la ciudad de las tres colinas, este municipio fue fundado en el año 1888, los primeros pobladores fueron indígenas Tahamies quienes realizaban trabajos relacionados con la producción de algodón, sal y productos agrícolas, con el paso del tiempo, se descubrió que la región es rica en aluviones y oro, el nombre del municipio se dio por un trabajador de la región llamado Lorenzo Yalí, él trabajaba en la mina y fue el primero en construir un rancho entre Yolombó y Remedios, a partir de esto, otros mineros empezaron a construir sus casas y así se construyó la primera calle del pueblo de Yalí.

#### **Figura 8.**

*Mapa Colombia, Yalí Antioquia.*

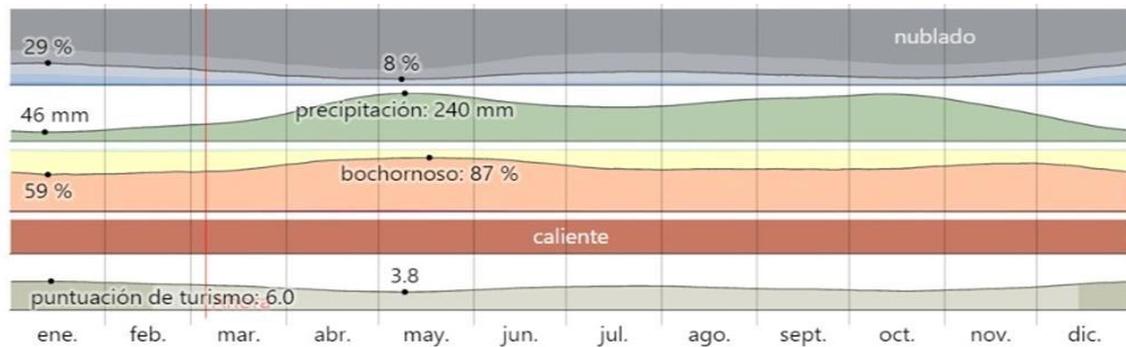


**Nota.** Mapa Colombia, Yalí, Antioquia. Tomado de: Nordeste Antioqueño. Familias Rodas Torres

Dicho territorio municipal tiene una superficie de 483 km<sup>2</sup>, con una altitud de 1217 metros, con una densidad poblacional de 13 habitantes/ km<sup>2</sup> para un total de 6273 habitantes (hasta la fecha actual reportada) [60]. La temperatura anual del territorio oscila en un rango de 19 a 26 °C, se entiende que en el municipio se caracteriza por sus lluvias constantes [61]. En las siguientes imágenes se presentan las variaciones de temperatura durante el año y su grado de humedad en el día:

**Figura 9.**

Temperatura promedio de Yalí.



**Nota.** Temperatura promedio de Yalí en el transcurso del año. Tomado de: El clima en Yalí, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia) - Weather Spark.

**Figura 10.**

Humedad promedio de Yalí.



**Nota.** Humedad promedio de Yalí en el transcurso del año. Tomado de: El clima en Yalí, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia).

La humedad relativa del aire en Yalí 97% con una característica de un aire saturado con agua, es decir, lluvioso con una presión de 1012 hPa.

## **2.2 Importancia del suelo**

El suelo surge gracias a la descomposición de las rocas al mezclarse con minerales y ciertas materias orgánicas más aire y agua, se define como la capa superficial que posee la corteza terrestre es considerado uno de los recursos naturales más importantes debido a que forma parte fundamental del equilibrio del ecosistema, se encarga de aportar nutrientes para los seres vivos gracias a sus propiedades químicas, físicas y biológicas, se conoce como un recurso no renovable, es decir el suelo no vuelve a tener las mismas propiedades luego de pasar por un proceso industrial donde no tengan buenas prácticas operativas en cuanto a los impactos ambientales que se generan.

En cuanto a la minería es una de las actividades que generan más deterioro al suelo, esto se debe a la cantidad que se obtiene de residuos pétreos o lodos contaminados de metales pesados, cuando esto ocurre se pierden ciertas propiedades físicas como químicas las cuales son [62]

- Pérdida de propiedades físicas: Variación en la porosidad y permeabilidad, la porosidad nos permite airear el suelo para que sus raíces se formen bien y la permeabilidad ayuda a transmitir el agua dentro del suelo, las variaciones que se presentan son causa del esponjamiento, el cual genera incremento en el volumen del suelo.
- Pérdida de propiedades químicas: El suelo que está expuesto a la actividad minera presenta contaminación por metales pesados, esto se da por la oxidación intensa que se genera en todo el proceso, este proceso libera hidrógeno y la mayoría de las reacciones de oxidación que se presentan son acidificantes, en este caso el pH del suelo desciende drásticamente.

## 2.3 Características físicas de la muestra del relave minero

Se adquiere un kilo de muestra de suelo del relave minero de Yalí Antioquia, el cual tiene las siguientes características físicas:

**Color:** con base al código de Munsell, se determina que es un tono de 7.5R (café), lo cual se define por su respectiva saturación y luminosidad. También se tiene en cuenta sobre su composición orgánica y su contenido de carbonatos.

**Consistencia del suelo:** firme, cuando se ejerce una presión fuerte se desvanece.

**Olor:** metal, fuerte

**Estructura del suelo:** granular (Imagen 11), normalmente tiene un diámetro menor o igual, se encuentra normalmente en superficies horizontales donde han crecido raíces. Tiene granos sueltos. Sin embargo, para una apreciación más específica se utiliza el triángulo de textura de suelo que se presenta a continuación:

La textura del suelo se relaciona con el contenido de las partículas, en este caso, teniendo en cuenta el tamaño de partícula se puede clasificar el suelo. La clasificación de la textura nos permite conocer las características necesarias para trabajar el suelo, adicionalmente, se identifica la cantidad de aire y agua que retienen o la velocidad en la que el agua puede penetrar dicha muestra.

El suelo se compone por fracciones y partículas de diferentes tamaños, el tamaño nos ayuda a clasificarlo de la siguiente manera:

**Tabla 2.**

*Textura de los suelos.*

TEXTURA SUELO	TAMAÑO
Arcilla	< 2 nm
Limo	2 – 20 nm
Arena fina	20 – 200 nm
Arena gruesa	200 – 2000 nm
Gravas	➤ 2000 nm

**Nota.** Textura del suelo según el tamaño. Tomado de: Ciancaglini Nicolás. (s.f). GUÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE TEXTURA DE SUELOS POR MÉTODO ORGANOLÉPTICO.

Con base a lo anterior, se procede a realizar un análisis del suelo de la muestra adquirida del relave minero. Para determinar el porcentaje de textura del suelo, ya sea para limo, arenoso y/o arcilla.

Se procede a realizar un procedimiento de tamizaje como se muestra en la siguiente imagen:

**Figura 11.**

*Tamiz de laboratorio.*



**Nota.** Practica de laboratorio por tamizado para análisis del suelo del relave minero.

En donde se procedió adicionar la muestra del relave minero adquirido en los respectivos tamices, en donde, se ejecuto durante 15 minutos seguidos. Posteriormente se procede a pesar cada una de las muestras por cada tamiz, como se puede observar en las siguientes imágenes:

**Figura 12.**

*Muestra de relave minero en tamiz.*



**Nota.** Tamizado del relave minero.

**Figura 13.**

*Obtención del resultado del tamizado.*



**Nota.** Resultado de la obtención de la muestra.

Una vez cumplido el tiempo, se obtienen los siguientes resultados por cada uno de los tamices:

**Tabla 3.**

*Resultados del tamizado.*

MALLA	PESO DE LA MUESTRA (g)
1 mm	240,6
850 µm	10,3
710 µm	8,1
710 µm	0,3
600 µm	7,1
425 µm	15,9
300 µm	54,5
96 µm	274,7
180 µm	2,6
45 µm	178,5
< 45 µm	328,7

**Nota.** Tabla de resultados obtenidos por el tamiz con respecto a la muestra del relave minero.

Es importante aclarar de que no se realizo mas mediciones, ya que, el lugar de desarrollo no proporciono más tamices para realizar dicho procedimiento.

Teniendo en cuenta a los resultados obtenidos se procede analizar el porcentaje de la textura, con la siguiente metodología. Inicialmente, se procede a realizar una sumatoria de los resultados registrados en la anterior tabla:

$$240,6 + 10,3 + 8,1 + 0,3 + 7,1 + 15,9 + 54,5 + 274,7 + 2,6 + 178,5 + 328,7 = 1121,3 \text{ g}$$

Se obtiene 1121,3 g de la muestra total adquirida de los tamices.

Por lo que, a continuación, se ejecuta la determinación de la clasificación y determinación de la textura del suelo:

**Fracción de arenas:**

Se realiza un cálculo en donde se toma la muestra total obtenida en los tamices menos el resultado obtenido de la muestra de la malla < 45 µm (tamaño estándar de arena), en donde se obtuvo el siguiente resultado:

$$1121,3 \text{ g} - 328,7 \text{ g} = 792,6 \text{ g}$$

$$\textit{Procentaje de arena} = \frac{792,6 \text{ g}}{1121,3 \text{ g}} = 70,68 \%$$

**Fracción de limo más arcilla:**

$$70,68 \% - 100 = 29,32 \%$$

Por lo anterior, se entiende que el 29,32% que dicha muestra es mitad de limo y mitad de arcilla. Sin embargo, por cuestiones de accesibilidad de los tamices para determinar los diámetros de las partículas del suelo restante, se implementa una metodología sensorial o también denominada como “*algoritmo de clasificación de la textura de suelo*”, la cual, consta de una continuidad de procedimientos para saber aproximadamente el porcentaje de textura del suelo, ya sea de limo y/o de arcilla.

Para este caso, se adquiere una muestra de 20 g aproximadamente de la muestra del suelo, se adhiere a un beaker y posteriormente se adicionan unas gotas de agua, adquiriendo así una masa viscosa. Seguidamente, se siguen las instrucciones para saber que textura consta la masa de la muestra.

Para el resultado de nuestra muestra se aprobó las siguientes indicaciones para así llegar adquirir un resultado de 20% limo y 9,32% arcilloso. Inicialmente se puede realizar una esfera con la masa realizada, posteriormente a ello, se realizó un “cilindro” con la masa con una longitud de 11,3 cm aproximadamente de una masa agrupada (no se evidencia ruptura), en el cual se indica que con relación a las anteriores acciones de que se trata de una suelo franco, sin embargo, finalmente para determinar si es un suelo arenoso o limoso, se palpa si se siente áspero, en nuestro caso se siente una textura

suave, lo que indica que es un suelo franco arenoso, tal como se muestra en las siguientes imágenes:

**Figura 14.**

*Practica de laboratorio prueba sensorial.*



**Nota.** Prueba sensorial por tacto.

**Figura 15.**

*Practica de laboratorio prueba sensorial.*

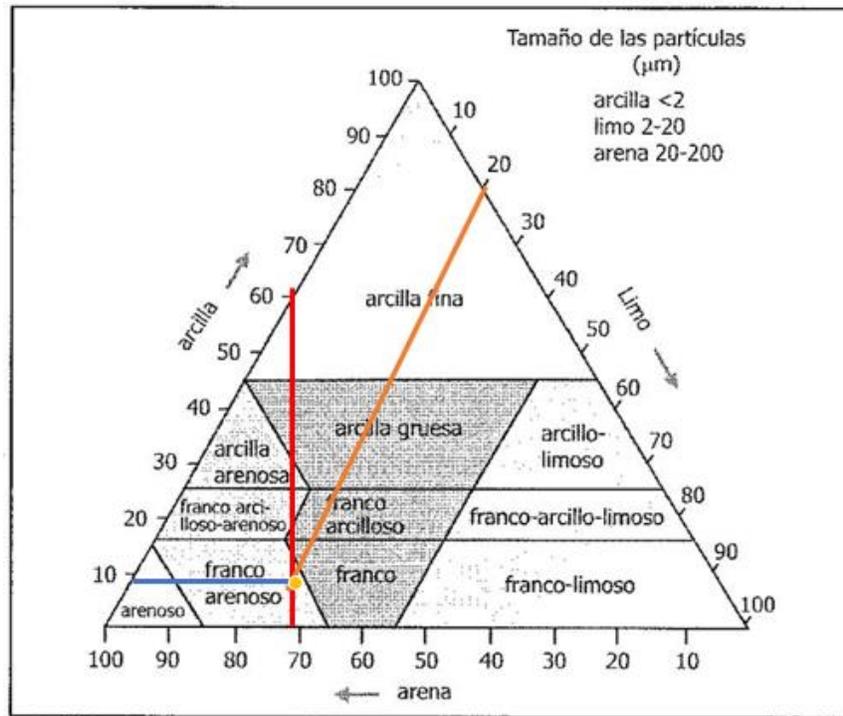


**Nota.** Analisis de porcentaje de textura del suelo.

Finalmente, al obtener los porcentajes de cada una de las texturas presenciadas en el suelo, se procedió a realizar un análisis por el triángulo de texturas de los suelos, como se muestra a continuación:

**Figura 16.**

*Análisis de textura de porcentajes del suelo.*



Clases texturales según criterio ISSS.

**Nota.** Triángulo de textura del suelo.

Con base a las practicas anteriormente mencionadas, se procede a clasificar cada uno de los porcentajes del suelo en presente triangulo (con respecto cada sesión). Adquiriendo un valor total de un suelo arenoso como se indica con el punto amarillo, con valores de 70,68% de un suelo arenoso, 20% de un suelo limoso y 9,32% de un suelo arcilloso.

Como análisis de dichos resultados, al obtener un porcentaje de 9,32% de un suelo arcilloso, indica una probabilidad baja de materia orgánica en el suelo, ya que, la formación de esta tiende a formarse en estructuras tales como suelos arcillosos (casi esféricos) porque se guarda humedad en ella y hay más factibilidad de vida microbiana en dichas estructuras.

### 2.3.1 Rango de concentraciones de metales pesados

<<Los metales pesados que se encuentran en el suelo se consideran tóxicos, en alguno de los casos pasan los niveles de toxicidad limite, el suelo es una mezcla de condiciones químicas y mecánicas de las rocas, cuando interviene la energía solar y el agua en el proceso de formación de las rocas ocurre una liberación de elementos por parte de las rocas, estos elementos pueden promover o atrasar el crecimiento de los seres vivos que interactuaran con el suelo en específico>> [63], se tienen rangos de concentraciones en algunos metales, los cuales determinan si el suelo presenta algún tipo de anomalía:

**Tabla 4.**

*Concentración metales pesados.*

Elemento	Rango Normal (ppm)	Concentraciones anómalas (ppm)
As	<5-40	Hasta 2500
Cd	<1-2	Hasta 30
Co	<0,05	
Cu	<60	Hasta 2000
Cr	<280	
Mn	<0,20	
Hg	<23	
Ni	2-100	Hasta 8000
Pb	10-150	10000 o más
Zn	25-200	10000 o más

**Nota.** Concentraciones metales pesados en el suelo. Tomado de: Galán Huertos & Romero Baena. p 49.

### 2.4 Determinación de materia orgánica en muestra de suelo Relave minero Yalí Antioquia

En este capítulo se determinará el diseño experimental del proyecto. El cual consiste en hallar experimentalmente la cantidad de materia orgánica en la muestra de suelo de Yalí Antioquia. Para ello, se realiza dos pruebas de laboratorio, las cuales son por el método de Walkley – Negro, para la determinación de carbonos en el suelo. Se realizaron los dos siguientes métodos de medición, uno de ellos es por la técnica volumétrica y el otro método consiste por la técnica de colorimétrica.

## Reactivos

- Dicromato de potasio 0,17 M
- Ácido sulfúrico R.A
- Ácido fosfórico R.A.
- Difenilamina 0,5%
- Sulfato ferroso 1 M
- Sacarosa R.A.

### **2.4.1 Método de Walkley – Negro**

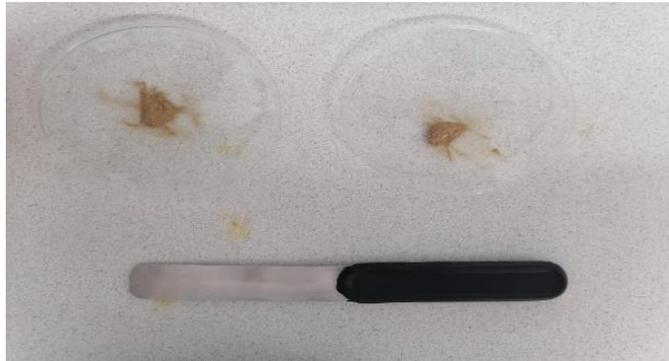
El método de Walkley – Negro consiste en la determinación de materia orgánica en el suelo, en donde se oxida en suelo con una solución de dicromato de potasio con ácido sulfúrico [64]. Para determinar la cantidad de materia orgánica por este método, se mide con respecto la cantidad de dicromato de potasio que no ha sido reducido, utilizando como indicador fenolftaleína, y también por medio de la ayuda del espectrofotómetro con una curva establecida por un límite de  $\lambda$  máxima = 585 nm en donde se relaciona directamente con la cantidad de materia orgánica para la respectiva curva de calibración [65].

### **2.4.2 Técnica volumétrica**

Con base a lo descrito anteriormente, se procedió a realizar la prueba de laboratorio por la técnica volumétrica. En donde se realizó el siguiente procedimiento; inicialmente se preparó una solución de dicromato de potasio 10 ml y ácido sulfúrico 10 ml, como se muestra en la siguiente imagen. Al realizar la solución, se determinó un aumento de temperatura por cual, se realizó lentamente el proceso para la adición del ácido.

**Figura 17.**

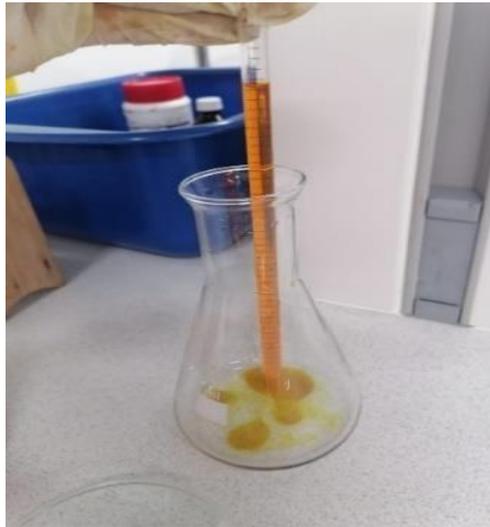
Muestra del suelo relave minero.



**Nota.** Muestra del suelo 0,30 g.

**Figura 18.**

*Solución dicromato de potasio.*

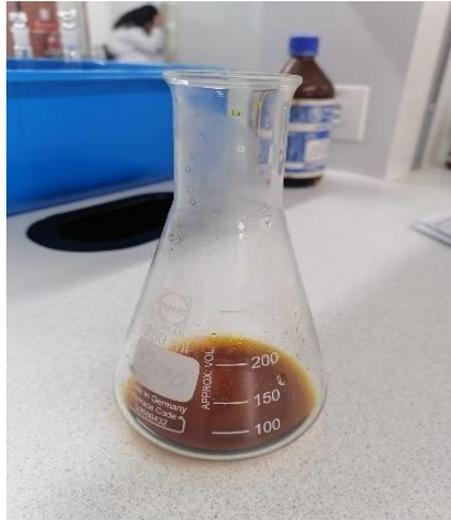


**Nota.** Adición de dicromato de potasio al ácido sulfúrico.

Al momento de tener lista la solución se añade 0,30 g de muestra del suelo minero procedente de Yalí Antioquía, donde posteriormente se realiza una agitación durante un minuto. Luego de ello se deja reposar durante 30 minutos.

**Figura 19.**

*Solución sulfato ferroso.*



**Nota.** Solución de ácido sulfúrico y dicromato de potasio.

Posteriormente, se añadió agua destilada hasta complementar 100 mL de solución, como se muestra en la siguiente imagen y se dejó reposar durante 30 minutos.

**Figura 20.**

*Solución sulfato ferroso a 100 mL.*



**Nota.** Solución de ácido sulfúrico y dicromato de potasio 100 mL.

Una vez transcurridos los 30 minutos, se añade 5 ml de ácido fosfórico y se deja reposar nuevamente 10 minutos.

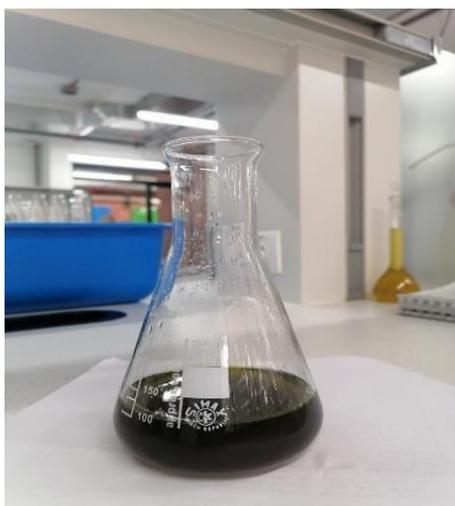
Transcurridos los 10 minutos, se añadieron 30 gotas del indicador de fenolftaleína, por el cual posteriormente se procedió a ver la titulación con una solución de sulfato ferroso para evidenciar el cambio de color anaranjado a un color verdoso, como se muestran en las siguientes imágenes.

**Figura 21.**  
*Solución del sulfato ferroso.*



**Nota.** Solución de ácido sulfúrico con dicromato de potasio antes de añadir sulfato ferroso.

**Figura 22.**  
*Solución del sulfato ferroso ya titulado.*



**Nota.** Solución de ácido sulfúrico con dicromato de potasio después de añadir sulfato ferroso.

Al añadir 1,5 mL de sulfato ferroso se evidencia el cambio de color de anaranjado a un verde oscuro como se muestra en las siguientes imágenes.

**Figura 23.**

*Titulación de la solución sulfato ferroso.*



**Nota.** Solución de ácido sulfúrico con dicromato de potasio después de añadir sulfato ferroso.

Al finalizar esta técnica volumétrica, se evidencia un viraje de color verde el cual indica una concentración de materia orgánica neutro, transcurre en un rango de 6,8 a 7,

Sin embargo, en correlación a la practica realizada se realiza la siguientes formula para hallar la cantidad de materia orgánica por le método de Walkley – White:

$$M.O. (\%) = \frac{N * V * 0,0037}{m}$$

En donde:

**N:** la normalidad de la solución

**V:** Volumen de la solución

**m:** masa de la muestra

**0,0037:** coeficiente del método.

Por lo cual, procedemos a remplazar los valores adquiridos en la siguiente muestra:

$$M. O. (\%) = \frac{0,1 N * 100 mL * 0,0037}{0,30 g} = 0,123\%$$

Al obtener un valor de 0,123% de materia orgánica se estipula una presencia muy baja de ella en la muestra del suelo. Este valor es importante para determinar los posibles factores que pueden afectar a la remoción del suelo. Ya que la cantidad de materia orgánica interactúa con la biodisponibilidad del suelo con algunos elementos específicos del suelo, como, por ejemplo; el cadmio, zinc, hierro, entre otros.

### 2.4.3 Técnica colorimétrica

Por otra parte, en esta técnica se realizó una solución de ácido sulfúrico 10 mL y de dicromato de potasio 10 mL y se añadió 0,30 g de muestra de suelo, como se muestra en la siguiente imagen.

**Figura 24.**

*Solución de sulfato ferroso 20 mL.*



**Nota.** Solución de ácido sulfúrico con dicromato de potasio y la muestra de suelo.

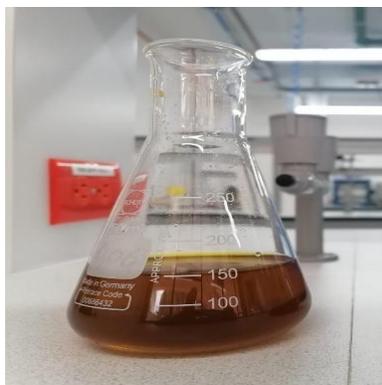
Posteriormente, se agitó vigorosamente durante 1 minuto y se dejó en reposo durante 30 minutos.

Transcurridos los 30 minutos, se añadió agua destilada hasta completar un volumen de 150 mL en donde, se agito nuevamente por un minuto y se dejó en reposo durante 24

horas.

**Figura 25.**

*Solución del sulfato ferroso a 100mL.*

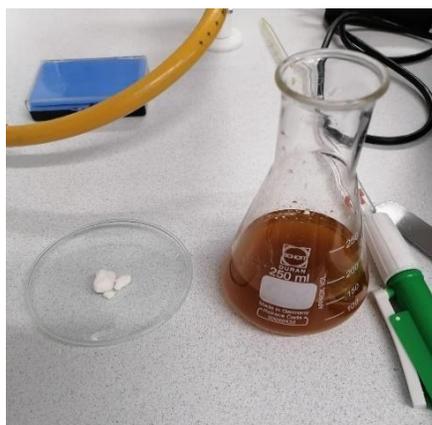


**Nota.** Solución de ácido sulfúrico con dicromato de potasio 150 mL.

Transcurridas las 24 horas, se procede a añadir 5 g de sacarosa a la solución para poder realizar una medición con el espectrofotómetro con un rango de absorbancia de 460 nm a 585 nm.

**Figura 26.**

*Solución del sulfato ferroso.*



**Nota.** Solución de ácido sulfúrico con dicromato de potasio con adición de sacarosa.

**Figura 27.**  
*Espectrofotómetro.*



**Nota.** Espectrofotómetro – curva de calibración.

Para ello se realizaron seis tomas de mediciones de la solución de dicromato de potasio con ácido sulfúrico y sacarosa al 5% p/p. Los cuales dieron los siguientes resultados:

**Tabla 5.**  
*Toma de curvas de absorbancia.*

Toma	Absorbancia (nm)
1	0.013
2	0.019
3	0.038
4	0.050
5	0.051
6	0.050

**Nota.** Toma de curva de absorbancia.

Una vez tomada las respectivas muestras, se procedió a tomar 6 alícuotas con las siguientes mediciones; 5, 10, 15, 20, 25 y 50 ml. En las cuales fueron puestas en 6 balones aforados de 100 mL.

Se completaron las respectivas soluciones hasta llegar a los 100 mL, y se volvió a realizar el mismo procedimiento de toma de curva de calibración.

**Figura 28.**

*Soluciones de sulfato ferroso a diferentes concentraciones.*



**Nota.** Soluciones de dicromato de potasio con ácido sulfúrico a diferentes concentraciones.

**Figura 29.**

*Resultados de las curvas de adsorción.*



**Nota.** Resultados de la curva de calibración.

**Tabla 6.**

*Tomas de curvas de absorbancia.*

<b>Toma</b>	<b>Muestra (ml)</b>	<b>Absorbancia</b>
1	5	-0.012
2	10	-0.003
3	15	-0.001
4	20	-0.003
5	25	-0.002
6	50	-0.001

**Nota.** Toma de curva de absorbancia con diferentes concentraciones.

Con los anteriores resultados, se determina de que las curvas de absorbancia no son las mas aptas para un valor específico de la determinación de materia orgánica del suelo, por ende, se procede a realizar otra metodología con el fin de adquirir un valor más exacto en correlación a la cantidad de materia orgánica presente en el suelo.

#### **2.4.4 Método de calcinación**

Para determinar la cantidad de materia orgánica en la muestra de suelo adquirido, se toma una muestra del suelo con una cantidad de:

- Limpia: 18,1 g
- Sucia: 20,5 g

Muestra del suelo ingresado a la mufla:

$$20,5 \text{ g} - 18,1 \text{ g} = 2,4 \text{ g}$$

Se deposita en un mortero para llevarla a una mufla de 600 °C durante 45 minutos. Con el fin de calcular la cantidad de materia orgánica presente en el suelo.

Una vez transcurridos los 45 minutos, se procede a retirar la muestra de la mufla, obteniendo como resultado la siguiente muestra:

**Figura 30.**

*Muestra de suelo por calcinación.*



**Nota.** Calcinación del amuestra a 600 °C.

Una vez teniendo la muestra de suelo después de un proceso de calcinación, se pesa nuevamente la muestra obteniendo un valor de 20,4 g. Posteriormente, se ejecuta el siguiente el cálculo de determinación de materia orgánica:

$$20,4 \text{ g} - 18,1 \text{ g} = 2,3 \text{ g}$$

En donde, se determina el siguiente porcentaje para contrarrestarlo con el valor que se adquirió con el valor anterior al proceso de calcinación y después del proceso de calcinación:

$$\frac{2,3 \text{ g}}{2,4 \text{ g}} * 100 = 95,8 \%$$

Siendo el 95,8% el resultado adquirido de materia inorgánica, por cual se contrarresta para obtener el valor resultante de materia orgánica, como se muestra a continuación:

$$100 - 95,8 \% = 4,2 \% \text{ *materia organica*}$$

Con respecto al porcentaje obtenido, se determina un porcentaje mínimo de materia

orgánica. Este resultado es debido a que la muestra de suelo pertenece a un porcentaje mayor de contextura arenosa, la cual, no beneficia en un almacenamiento y/o contenido de materia orgánica, como se menciona anteriormente en el análisis de la textura del suelo.

### 3. CARACTERIZACIÓN CÁSCARA *MANIHOT ESCULENTA*

En el presente capítulo, se presenta la caracterización de las cáscaras *Manihot esculenta* amarga y dulce. En donde, se realiza dos análisis de las cáscaras con la misma muestra del suelo adquirido de Yalí Antioquia. Con el fin de evidenciar la mayor eficiencia de remoción de mercurio con cada una de las cáscaras amarga o dulce. Para ello, se indago la procedencia del suelo en donde se cultivó la yuca, las condiciones ambientales, la capacidad de remoción que tiene la yuca para la remoción de metales pesados y el tiempo relativo en el cual puede lograr la remoción del metal.

#### 3.1 Composición *Manihot esculenta*

**Tabla 7.**

*Clasificación de la yuca.*

CLASIFICACIÓN CIENTÍFICA	
REINO	Plantae
DIVISIÓN	Magnoliophyta
CLASE	Magnoliopsida
ORDEN	Euphorbiales
FAMILIA	Euphorbiaceae
SUBFAMILIA	Crotonoideae
GÉNERO	Manihot
ESPECIE	<i>Manihot esculenta</i>

**Nota.** Clasificación científica *Manihot esculenta*. Tomado de: Cock, J H. 1989. Cassava. New potential for a neglected crop. Westview Press, Boulder, CO.

El nombre científico es *Manihot esculenta* Crantz, la yuca, tiene una forma cilíndrica, cuenta con aproximadamente 1 metro de largo y 10 centímetros de diámetro, sin embargo, el arbusto de la yuca se llama Perenne y este alcanza aproximadamente 2 metros de largo. Esta planta cambia su forma dependiendo la ramificación [66].

Esta planta es originaria del centro de América del Sur, el cultivo se da frecuentemente en zonas tropicales y subtropicales del continente americano. Gracias a las condiciones climáticas en las zonas africanas se logró introducir la cosecha de la yuca. La *Manihot esculenta* para su crecimiento necesita zonas intertropicales, es importante que el ambiente de cosecha presente altos niveles de humedad y a su vez rayos directos del sol para poder crecer, de esta manera, si se encuentra en una zona de bajas temperaturas su crecimiento se verá afectado [67].

En el año 1766 Crantz, médico biólogo y botánico propuso el nombre científico de la yuca, del año 1827 al 1910 los científicos Pohl y Pax reclasificaron la yuca como dos especies totalmente diferentes, en la cual se habla de la yuca amarga (*M. utilissima*) y la yuca dulce (*M. aipi*) [68].

- YUCA AMARGA: contenido de cianogénicos en toda la raíz.
- YUCA DULCE: contenido de cianogénicos en cáscara.

Los cianogénicos son toxinas vegetales, en algunos casos se encuentran en la parte comestible y otras en la cáscara del vegetal, la estructura de estas toxinas tiene un grupo nitrilo unido a un carbón que a la vez un azúcar que se enlaza por medio de un glicosídico [69].

El nivel presente de glucósidos cianogénicos o de ácido cianhídrico determina el tipo de especie yuca amarga y yuca dulce, según el centro internacional de agricultura tropical (CIAT), clasifica la variedad de yucas de la siguiente manera [70]:

Menos de 180 ppm de HCN (base seca) → Yuca dulce

Entre 180 – 300 ppm de HCN (base seca) → Intermedio

Mayor de 300 ppm de HCN (base seca) → Yuca amarga

El contenido de cianogénicos en los tejidos de la yuca se afecta directamente por las condiciones edafoclimáticas en el cual se cultivan, también depende del mes en el cual se realiza la siembra; El contenido de estas toxinas en la yuca amarga equivale a un

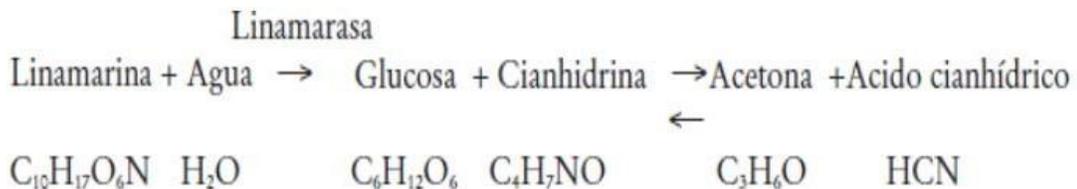
1000 mg por raíz fresca, mientras que en la yuca dulce solo se presentan 20 mg de toxinas por raíz fresca, es por esto, que la yuca amarga tiene restricciones para el consumo directo por es ser humano, este tipo de yuca se implementa en procesos industriales [56].

### 3.1.1 Ácido cianhídrico

La planta *Manihot esculenta* posee dos glucósidos cianhídricos, linamarina y lotaustralina estos glucósidos por la acción de la enzima linamarasa al hidrolizarse, generan glucosa y cianhidrina, para el caso de la cianhidrina en el proceso de obtención de la planta, se descomponen en acetona y ácido cianhídrico gaseoso, para este caso es fundamental conocer el porcentaje y concentración adicionada de las sustancias mencionadas ya que si supera el límite permitido puede ocasionar toxicidad [71].

**Figura 31.**

*Reacción ácido cianhídrico.*



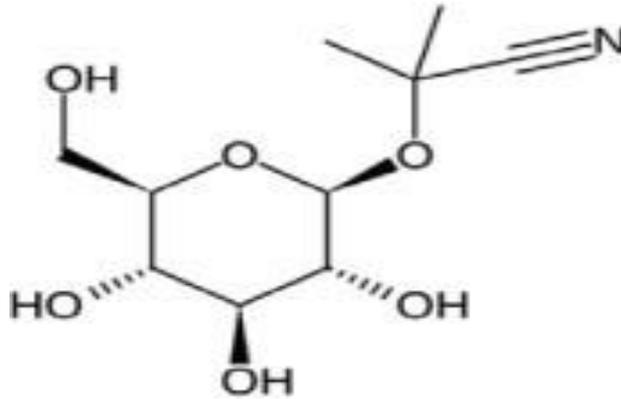
**Nota.** Reacción de formación ácido cianhídrico. Tomado de: Rojas Magda. (2012) ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA YUCA (*Manihot esculenta* Crantz) Y SUS EFECTOS EN LA CALIDAD DE HOJUELAS FRITAS PARA SU PROCESAMIENTO EN LA EMPRESA PRONAL S.A.

Linamarina → Glucósido cianogénico, este lo podemos encontrar en las hojas o raíces de la yuca, aproximadamente el 85 al 90% de este glucósido se encuentre en el tejido de la *Manihot esculenta*, este logra descomponerse por efecto de las enzimas y la flora intestinal del ser humano que las consume, para neutralizar las toxinas presentes en el alimento es fundamental que pase por un proceso de preparación [72].

## Estructura:

**Figura 32.**

*Estructura Linamarina.*



**Nota.** Estructura química Linamarina. Tomado de:  
Rodríguez Juan. Mtez Monserrat. Rivadeneyra

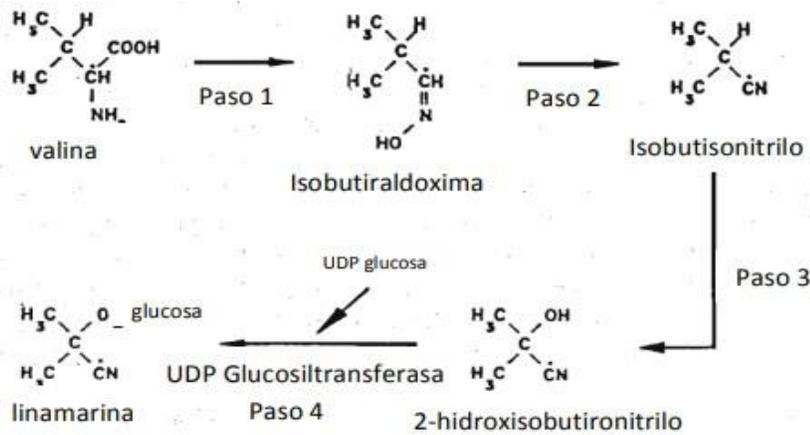
**Lotaustralina:** este glucósido se presenta en menor cantidad, aproximadamente del 10 al 15% por lo tanto su efecto es menor [60].

Ruta sintética linamarina y lotaustralina:

Estos glucósidos logran sintetizarse gracias al aminoácido valina para el caso de la linamarina y la isoleucina para la lotaustralina, en su ruta de biosíntesis son catalizadas por dos membranas las cuales se encuentran unidas al citocromo multifuncional P450, esta ruta se muestra a continuación:

**Figura 33.**

*Ruta biosintética Linamarina.*



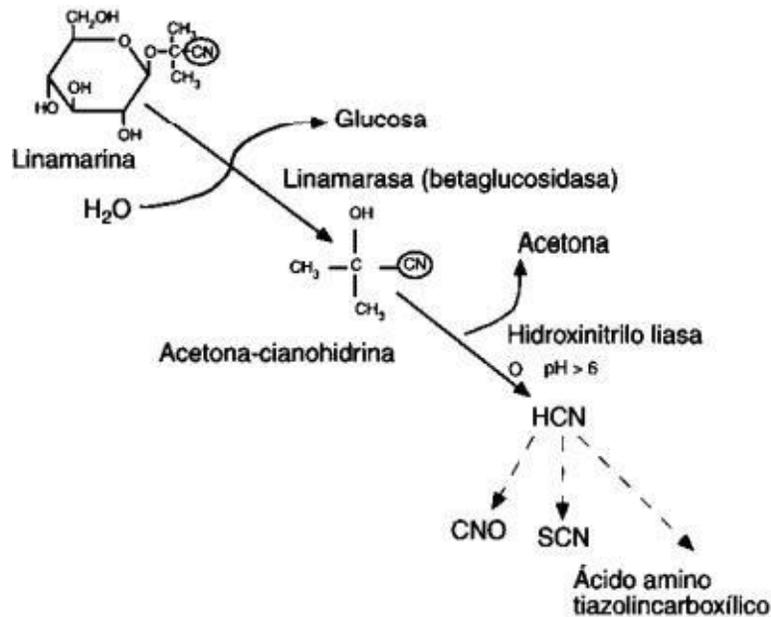
**Nota.** Ruta biosintética Linamarina. Tomado de. Jansz Y Uluwaduge. (1997)

El alto porcentaje presente de cianuro inactiva el citocromo mitocondrial oxidasa, lo que provoca una obstrucción en la respiración celular, al momento de eliminar los componentes presentes en la *Manihot esculenta* de cianuro, se pierde una fuente considerable de proteínas, vitaminas y minerales que favorecen al valor nutricional del cultivo.

La obtención de cianuro se da a partir de dos etapas como se muestra en la imagen 29; en la primera etapa, la linamarasa separa la glucosa de la aglicona, antes de que la planta sea sometida a cualquier proceso, la linamarina y la linamarasa están ubicados en compartimientos celulares diferentes, sin embargo, al momento de procesar la planta, estos dos componentes se ponen en contacto y se activa la cianogenia, cuando este se encuentra en contacto con pH neutro o básico es inestable y se descompone fácilmente.

**Figura 34.**

*Metabolismo del cianuro.*



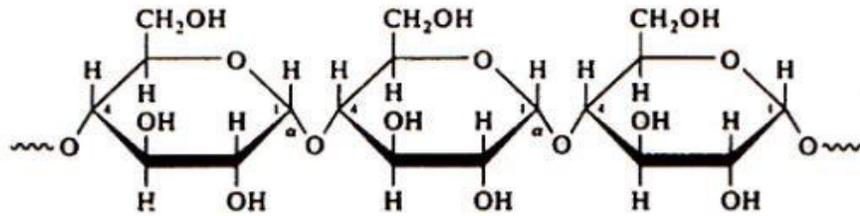
**Nota.** Cianogenia a partir de linamarina y del metabolismo del cianuro en mamíferos. Tomado de: Llorens. (2004)

### 3.1.2 Amilosa

<<Polímero lineal formado a partir de moléculas de glucosa, la amilosa se da gracias a la condensación generada de D-glucopiranosas, estos se encuentran unidos por medio de enlaces  $\alpha$  [1-4], de esta manera, se establecen largas cadenas lineales, en los grupos hidroxilos que posee se encuentran múltiples enlaces de hidrogeno>> [73] en este caso, los enlaces se encargan de la forma cristalizada que presenta el almidón, cuando la temperatura aumenta estos enlaces se rompen, los enlaces de hidrogeno también permiten la adsorción de agua y la formación de geles, “un gel es un coloide la estructura es similar a la de un sólido, sin embargo, su densidad se asemeja a la de un líquido, cuando la sustancia pasa por un proceso de coagulación tiende a espesarse o solidificarse” [74].

**Figura 35.**

*Estructura amilosa.*



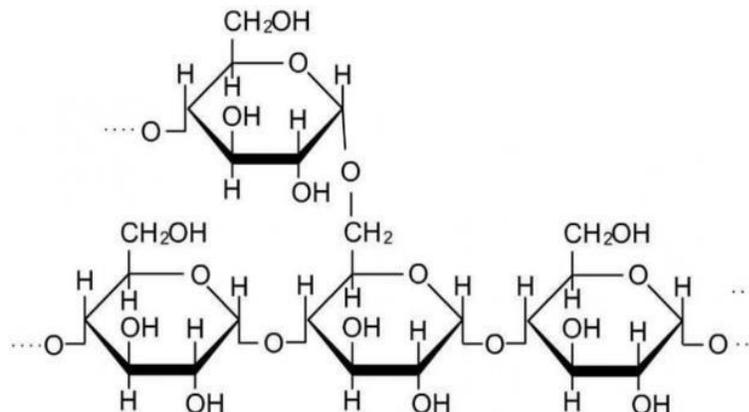
**Nota.** Estructura lineal de la amilosa. Tomado de: Aristizábal et al., 2007

### 3.1.3 Amilopectina

<< Polisacárido ramificado de D-glucosa, posee enlaces lineales  $\alpha$  [1-4], los cuales se encuentran unidos y ramificados en enlaces  $\alpha$  [1-6], la amilopectina conforma alrededor del 75% de los almidones, esto se da gracias a que se encuentra constituida por alrededor de 100.000 moléculas de glucosa>> [75].

**Figura 36.**

*Estructura amilopectina.*



**Nota.** Estructura amilopectina. Tomado de: Aristizábal et al., 2007

## Propiedades de los componentes:

**Tabla 8.**

*Propiedades amilosa y amilopectina.*

PROPIEDAD	AMILOSA	AMILOPECTINA
Estructura	Lineal	Ramificada
Peso molecular	40000 hasta 10 <sup>6</sup>	200000 hasta 10 <sup>9</sup>
Estabilidad en soluciones acuosas	Retrógrada	Estable
Retrogradación	Rápida	Lenta
Gel	Firme e irreversible	Suave y reversible
Formación de complejos	Favorable	Desfavorable
Patrón rayos X	Cristalino	Amorfo
Reacción con yodo	19 – 20%	5 - 9%
Color solución yodo	Azul profundo	Violeta
Longitud de onda (nm)	660	530 - 550

**Nota.** Propiedades de la amilosa y la amilopectina. Tomado de: Aristizábal Johanna. Sánchez Teresa. (2007). GUÍA TÉCNICA PARA PRODUCCIÓN Y ANÁLISIS DE ALMIDÓN DE YUCA.

Con base a la estructura y la composición orgánica de la cáscara de yuca expuesta anteriormente, se estipula que el mecanismo de remoción de la cáscara de yuca frente al mercurio es la adsorción que comprende en las propiedades de la composición de la yuca. La cáscara de yuca posee diferentes composiciones orgánicas (como se expone anteriormente), en donde, interactúan directamente con algunos metales, en este caso del mercurio. Al componerse de dichas estructuras estas a su vez se adhieren a fuerzas iónicas generando una estabilidad entre metales [75].

Sin embargo, se tiene en cuenta que la cáscara de yuca está compuesta por una concentración de glúcidos cianogénicos por la formación del ácido cianhídrico, en donde estos ayudan a la reducción del mercurio ya que contienen una cantidad de cianuro y este actúa como agente oxidante, el cual, interactúa con el mercurio libre, como se presenta a continuación:



Al iniciar una interacción entre el cianuro y el mercurio, generando una estabilidad entre ellos, en donde el mercurio queda capturado en la cascara de yuca cumpliendo la

remoción del suelo [93].

### **3.2 *Manihot esculenta* en Colombia**

La yuca es uno de los alimentos que contribuyen la mayor fuente de energía en el mundo, es uno de los bienes agrícolas que más se producen en Colombia, esto se debe a la capacidad que presenta el cultivo de adaptarse a las diferentes condiciones geográficas que se puedan presentar, esto favorece de manera positiva a la agricultura, se considera una reserva importante cuando se presentan malas cosechas de otros alimentos [76].

La yuca se cultiva en alrededor de 32 departamentos, sin embargo, se producen dos tipos de yuca, yuca dulce, esta conserva su color blanco durante la cocción (Yuca mesa) y amarga, esta yuca, toma un color amarillo al momento de cocinarse (Yuca industrial), este alimento es considerado la base de alimentación para las poblaciones indígenas nativas, es por esto, que la mayor producción de yuca se encuentra en los departamentos de Vichada, Guaviare, Guainía y Amazonas [77].

En Colombia se producen alrededor de 2 millones de toneladas de Yuca anualmente, la región del Caribe aporta el 50% de la producción total [78].

Para obtener un cultivo de buena calidad y que presente todos los nutrientes o componentes que deseamos es necesario que el proceso de producción se dé en las mejores condiciones, es por ello, que se deben tener en cuenta ciertas características.

#### **3.2.1 *Importancia del suelo***

El suelo es fundamental a la hora de sembrar cualquier tipo de cultivo, para el caso de la Yuca, el clima, la temperatura y otras características físicas y biológicas, son determinantes para obtener un producto de calidad, antes de sembrar, se debe conocer el área de cosecha para de esta manera evitar zonas de encharcamiento, esto nos permite que la semilla presente altos niveles de brotación y a su vez de producción [79].

La siembra se realiza en época de sequía, de esta manera se prepara la tierra para que se aproveche la temporada de lluvias para que el desarrollo de las raíces sea el mejor, cuando se realiza la siembra en altos niveles de humedad el suelo tarda más tiempo en secarse lo cual causara endurecimiento y el tiempo de cosecha será más largo y menos eficiente [80].

### ***3.2.2 Importancia de la siembra***

Para obtener buenos resultados en la producción de yuca es fundamental seleccionar materiales de alta calidad, esto con el fin del potencial de rendimiento, la planta seleccionada, la estabilidad y la resistencia a las plagas sea el requerido; la calidad en las semillas se da gracias a la madurez y grosor del tallo, a su vez, es fundamental la manipulación que estas tienen al momento de la siembra.

La siembra se puede realizar de dos maneras, de forma manual y de manera mecanizada, sin importar el método implementado, se debe garantizar la profundidad de las semillas las cuales se deben encontrar entre 5-8 cm, para el caso de la longitud de las estacas lo ideal son estacas de 15 a 30 cm, se ha demostrado que la posición de las estacas no determina el rendimiento de la misma, sin embargo, cuando las estacas se ponen horizontalmente las raíces se encuentran separadas facilitando de esta manera la cosecha [81].

### ***3.2.3 Control de maleza***

La primera etapa del cultivo es fundamental, esto se debe a que se puede perder aproximadamente el 50% del rendimiento de la misma si no se tiene un control en los diferentes aspectos que pueden afectar negativamente la cosecha, es por esto, que el control de la maleza debe ser estricto, si el control se realiza de manera manual las plantaciones se hacen en áreas pequeñas, aproximadamente se usan 15 jornales y el deshierbe se realiza constantemente hasta que el cultivo haya cerrado de manera correcta evitando así desarrollo de la maleza, ya que, la entrada de luz se verá reducida

[82].

En el caso de los controles químicos, se buscan herbicidas amigables con la planta para que no reduzcan el rendimiento del cultivo, pero sean lo suficientemente agresivos con la maleza que se puede encontrar en el proceso, es por esto que conocer el suelo antes de realizar la siembra es fundamental, por así, usaremos el químico específico.

Los controles son obligatorios debido a que la yuca es uno de los cultivos que genera mayor cantidad de maleza, esto se debe, a que el crecimiento de las semillas es lento para permitir un adecuado desarrollo del cultivo [70].

### **3.2.4 Zonas productoras *Manihot esculenta***

El cultivo de yuca logra adaptarse a diversas condiciones ambientales, la semilla logra crecer sin importar que se encuentre a los 0 o a los 2000 metros sobre el nivel del mar, condiciones como la temperatura y la humedad cuentan con rangos amplios los cuales permite el crecimiento de la planta, gracias a los mecanismos fisiológicos que posee la yuca, los niveles de adaptación permiten resistencia y rendimientos favorables a pesar de ser una cosecha de crecimiento lento [83].

Colombia cuenta con 6 zonas productoras de yuca, cada una de estas zonas poseen características totalmente diferentes, sin embargo, se obtienen cultivos de alta calidad, para elegir la zona de la cual tomaremos la cascara de yuca es fundamental comparar las condiciones de cultivo, esto con el fin de implementar en nuestro proyecto la yuca que posea las mejores características:

**Tabla 9.***Zonas productoras de yuca.*

ZONA AGROECOLOGICA	CARACTERÍSTICAS	DEPARTAMENTO
Costa atlántica	Clima tropical entre semiárido y subhúmedo. Clima unimodal con estación seca prolongada. Temperatura >24°C. Precipitación 700 a 1500 mm/año.	Atlántico Bolívar Cesar Magdalena Córdoba Sucre
Orinoquia	Sabanas de suelos ácidos. Altura < 300 nsnm. Clima unimodal con estación seca prolongada. Temperatura >24°C. Humedad relativa alta. Precipitación 1500 a 4000 mm/año.	Meta Casanare Arauca
Amazonia y Andén Pacífico	Trópico bajo. Estación seca leve y lluvias abundantes. Precipitación > 3500 mm/año. Altura < 300 msnm. Humedad relativa alta y constante.	Caquetá Putumayo Amazonas Nariño Chocó
Valle del Cauca Norte del Cauca	Trópico medio. Altura 800 a 1200 msnm. Temperatura 24 a 28°C. Humedad relativa alta. Precipitación 1000 a 2000 mm/año.	Valle del Cauca Norte del Cauca
Zona Cafetera	Clima bimodal. Trópico alto. Altura 1300 a 2000 msnm.	Caldas Quindío

**Nota.** Zonas productoras *Manihot esculenta*. **Tomado de:** Cadavid, L.F. 2006.

**Tabla 9.**

(Continuación)

	Temperatura 24 a 20°C. Precipitación 1500 a 2500 mm/año. Régimen de lluvias bien distribuidas.	Risaralda Antioquia Santander Tolima Cauca
Valle del alto Magdalena	Trópico entre semiárido y subhúmedo. Altura 100 a 1000 msnm. Clima bimodal. Temperatura > 24°C. Humedad relativa muy baja. Precipitación 900 a 2300 mm/año.	Tolima Huila

**Nota.** Zonas productoras Manihot esculenta. Tomado de: Cadavid, L.F. 2006.

### 3.3 Selección de la yuca

Teniendo en cuenta las características que se evaluaron anteriormente, la cáscara de Yuca que se implementará en nuestro proyecto proviene de Fonseca a Distracción, La Guajira.

Teniendo en cuenta las características que se evaluaron anteriormente, la cáscara de Yuca que se implementará en nuestro proyecto proviene de Fonseca a Distracción, La Guajira.

**Figuras 37 Y 38.**

*Planta Manihot esculenta.*



**Nota.** Planta Manihot esculenta.

Como se mencionó anteriormente se están implementando 2 tipo de yuca, yuca amarga y yuca dulce; para secar la cáscara, esta se expuso al sol por 48 horas:

**Cáscara de yuca amarga**

En la imagen 34 y 35 se muestra la cáscara de yuca amarga que fue recolectada y previamente expuestas al sol con el fin de presentar la menor cantidad de humedad posible.

**Figuras 39 Y 40.**

*Cáscara de yuca amarga.*



**Nota.** Cáscara de yuca amarga.

## Cáscara de yuca dulce

En la imagen 36 y 37 se muestra la cáscara de yuca dulce que fue recolectada y previamente expuestas al sol con el fin de presentar la menor cantidad de humedad posible.

### Figuras 41 Y 42.

*Cáscara de yuca dulce.*



**Nota.** Cáscara de yuca dulce.

La cáscara de la yuca dulce y amarga, se cortó en trozos debido a que para el proyecto se quería implementar el residuo, en este caso la cascara, que se obtiene al momento implementar la yuca en alguna preparación y de esa manera no solo absorber, en este caso el mercurio, sino que también, se busca aprovechar lo que en este caso ya sería un residuo, es por esto que, los trozos de la cáscara no tienen tamaños similares; lo que sí se intentó hacer fue retirar la mayor parte de almidón posible que quedo incorporado a la cáscara.

### 3.4 Consecuencias ambientales de la cosecha de yuca

Las actividades de agricultura emplean aproximadamente el 70% de agua que es extraída a nivel mundial, adicionalmente, la agricultura es una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, en esta actividad se libera gran cantidad de dióxido de carbón por medio de la combustión de la biomasa, también, se presentan emisiones de metano, es

por esto, que la actividad agrícola representa un efecto negativo en el medio ambiente debido al impacto que se genera en el cambio climático, a esto se le suma la deforestación, esta actividad, deteriora los suelos al buscar, de manera inadecuada la expansión de las áreas necesarias para el cultivo [84].

No solo la actividad agrícola genera impactos negativos, los residuos generados en todo el proceso de cultivo también, la problemática de los residuos es que no se tratan de manera adecuada, las malas prácticas que se presentan son [85]:

La cascara de la yuca dulce y amarga, se cortó en trozos debido a que para el proyecto se quería quema indiscriminada: Es una de las prácticas más implementadas, sin embargo, es de las prácticas que genera mayor impacto por el riesgo que representa de posibles incendios y la emisión de gases que este provoca [68].

**Figura 43.**

*Actividad agrícola, yuca.*



**Nota.** Actividad agrícola en Colombia. **Tomado de:** UNAL. (2022). Variedades de yuca se pierden por tenencia de la tierra y políticas de mercado.

Es por esto, que se crea la necesidad de implementar los residuos nuevamente en la cadena de producción, se busca valorizar los residuos y a la vez, disminuir el impacto que pueden generar en el medio ambiente.

### **3.5 Tecnología de adsorción del mercurio mediante *Manihot esculenta***

Como se mencionó en el capítulo anterior las tecnologías para disminuir la contaminación generada por los procesos de minería son muy costosas, de aquí se genera la necesidad de buscar alternativas a bajo costos y que sean eficientes.

La adsorción es una tecnología de bajo costo la cual permite la retención de diferentes metales presentes en la muestra, en este caso, el sólido seleccionado para concentrar los componentes químicos generados en el sector minero es la cascara de Yuca.

Este proceso es exotérmico, en este caso, cuando el adsorbente no está saturado la temperatura se genera de manera espontánea, cuando la temperatura aumenta, la textura del adsorbente cambia y se genera un deterioro de la muestra [86].

#### 4. IMPLEMENTACIÓN MANIHOT ESCULENTA

En el presente capítulo, se evidencia el procedimiento experimental de la remoción de la *Manihot esculenta* con la muestra del suelo adquirido de Yalí Antioquia. Luego de realizar las mediciones de la muestra proveniente de Yalí y que la yuca estuviera expuesta a un proceso de secado a una temperatura de 31°C por un tiempo de una semana aproximadamente, tanto dulce como amarga, se dividió la muestra de suelo en cuatro partes con el fin de realizar el proyecto por duplicado debido a que se tienen dos tipos de cascara de yuca diferentes, en este caso, 2 partes de la muestra, se mezclaron con la cascara de yuca dulce y las otras 2 partes con la cascara de yuca amarga, esto lo realizamos con el fin de determinar qué tipo de yuca favorece a la adsorción de los metales pesados que posee la muestra, en nuestro caso, analizaremos la adsorción que la cascara tenga con el mercurio de la muestra, sin embargo, en los relaves mineros se tienen otros tipos de metales, es por esto, que se las mediciones nos van a permitir determinar qué metales se encuentran presentes en esta muestra de suelo en específico y que variación presentaran al entrar en contacto con la *Manihot esculenta*.

**Figura 44.**

*Muestra del suelo.*



**Nota.** Separación del suelo en 4 para la remoción del mercurio por medio de la cáscara *Manihot esculenta*.

Debido a que la absorción se logra gracias al contacto entre la cascara y la muestra, lo que se hizo con el fin de garantizar que el suelo quedara en contacto al 100% con la cascara de yuca, fue cada dos días remover las cuatro partes que se tenían de la muestra del relave con el fin de que la cáscara adsorbiera la mayor cantidad de metales posibles, esto se hizo durante un mes y medio; en el siguiente mes y medio no se removía la tierra, se dejó la muestra de suelo con la cáscara de yuca sin realizar ningún tipo de intervención.

A los 3 meses de que se realizó la primera medición del suelo contaminado, se tomó la segunda medición del suelo con el fin de determinar el comportamiento y la capacidad de adsorción que tuvo la cascara a las condiciones establecidas.

## 5. REMOCIÓN DE MERCURIO MEDIANTE LA CÁSCARA *MANIHOT ESCULENTA*

### 5.1 Primera medición en la muestra de suelo contaminado

En la primera medición de la muestra de relave minero, no se realizó ningún tipo de modificación, la muestra se dejó expuesta al medio ambiente con el fin de que no presentara tanta humedad debido a que el suelo venía compacto, esta medición se hizo con el objetivo de determinar las condiciones iniciales que presenta un suelo contaminado por el sector minero.

Se realizaron 4 mediciones en total para obtener resultados de toda la muestra e identificar de qué manera varía la concentración de metales presentes en el suelo, cada una de las mediciones se hizo en un tiempo de 30 segundos.

<b>Tiempo</b>	30 Seg
<b>Fecha</b>	5 de enero 2023

En las siguientes tablas se mostrarán datos obtenidos de la medición del suelo, los metales que aparecen en dichas tablas, fueron los elementos detectados en el relave minero, en cada una de las mediciones realizadas se obtuvieron diferentes resultados, esto se debe a que la muestra se removió con el fin de identificar si los metales que se encontraban en cada una de las mediciones eran los mismos a su vez obtener resultados de toda la muestra:

**Medición 1:****Tabla 10.***Primera remoción relave minero.*

Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	6,23%	0,08
1	Cobre	Cu	502	23
1	Zinc	Zn	295	15
1	Arsénico	As	195	12
1	Rubidio	Rb	30	2
1	Estroncio	Sr	31	2
1	Circonio	Zr	106	5
1	Mercurio	Hg	60	9
1	Plomo	Pb	340	13

**Nota.** Mediciones del relave minero.

**Medición 2:****Tabla 11.***Segunda remoción relave minero.*

Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
2	Hierro	Fe	5,82%	0,09
2	Cobre	Cu	581	26
2	Zinc	Zn	349	17
2	Arsénico	As	115	14
2	Rubidio	Rb	26	3
2	Estroncio	Sr	31	3
2	Circonio	Zr	127	6
2	Mercurio	Hg	48	9
2	Plomo	Pb	511	17

**Nota.** Mediciones del relave minero.

**Medición 3:****Tabla 12.***Tercera remoción relave minero.*

<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
<b>3</b>	<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	5,48 %	0,08
<b>3</b>	<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	453	23
<b>3</b>	<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	375	18
<b>3</b>	<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	117	13
<b>3</b>	<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	23	2
<b>3</b>	<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	23	2
<b>3</b>	<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	95	5
<b>3</b>	<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	45	9
<b>3</b>	<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	418	15

**Nota.** Mediciones del relave minero.**Medición 4:****Tabla 13.***Cuarta remoción relave minero.*

<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
<b>4</b>	<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	5,95 %	0,09
<b>4</b>	<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	449	24
<b>4</b>	<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	377	18
<b>4</b>	<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	114	15
<b>4</b>	<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	23	3
<b>4</b>	<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	32	3
<b>4</b>	<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	102	5
<b>4</b>	<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	39	9
<b>4</b>	<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	559	18

**Nota.** Mediciones del relave minero.

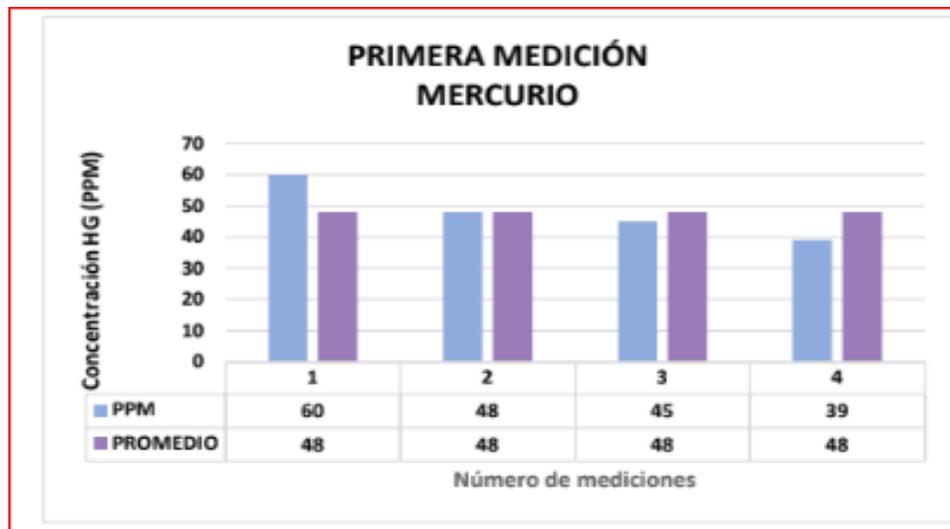
Al realizar las cuatro mediciones se evidencia que las concentraciones de los metales

son diferentes, esto se debe a que la muestra no se encuentra completamente homogenizada y en los diferentes puntos en los que se tomaron las mediciones, las concentraciones son diferentes, por lo tanto, es necesario realizar un promedio de esos cuatros mediciones y obtener un solo valor, el cual representará la mayor parte de la muestra.

En la siguiente gráfica se obtiene el promedio de las cuatro mediciones para el suelo, en el caso de la primera medición no se realizó modificación de la muestra, tal como se recibió la muestra proveniente de Yalí Antioquia se realizaron las respectivas mediciones, para nuestro metal de interés que es el mercurio, se obtiene una concentración de 48 ppm, teniendo en cuenta este valor, se va a realizar la remediación del mercurio mediante la *Manihot esculenta*.

**Figura 45.**

*Promedio de mercurio en la primera medición.*



**Nota.** Gráfica 1 promedios de concentración del mercurio en la primera medición.

### Promedio metales pesados

Las cuatro mediciones realizadas se hicieron con el fin de analizar toda la muestra es por esto por lo que es necesario realizar un promedio de las cuatro mediciones y obtener un solo resultado para la medición del relave minero y de esta manera poder determinar que alteraciones irá presentando a lo largo del proyecto:

**Tabla 14.**

*Promedio de mediciones del relave.*

<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
<b>Titanio</b>	<b>Ti</b>	1072,75	251,5
<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	0,0587	0,085
<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	496,25	24
<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	349	17
<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	135,25	13,5
<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	25,5	2,5
<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	29,25	2,5
<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	107,5	5,25
<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	48	9
<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	457	15,75

**Nota.** Promedio de las cuatro mediciones del relave minero.

Adicionalmente, se realiza la siguiente gráfica para tener presente el comportamiento de los otros metales que se encuentran presentes en el suelo, a pesar de que el objetivo es remediar el mercurio, la *Manihot esculenta* podría funcionar en la remediación de otros metales.

## 5.2 Segunda medición en la muestra de suelo contaminado

Para el caso de la segunda medición de suelo contaminado, como se explicó en el capítulo anterior, se dividió la muestra en 4 partes, al tener dos tipos de cascara de yuca era necesario implementar cada una de ellas en una parte igual de muestra de suelo.

En este caso también se realizaron varias mediciones con el fin de obtener un resultado de toda la muestra:

### 5.2.1 Cáscara de yuca amarilla

Tiempo	30 Seg
Fecha	4 de abril del 2023

#### Medición 1:

Tabla 15.

*Primera medición del relave minero.*

Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	8,03%	0,13
1	Cobre	Cu	613	30
1	Zinc	Zn	398	21
1	Arsénico	As	208	17
1	Rubidio	Rb	30	3
1	Estroncio	Sr	38	3
1	Circonio	Zr	90	6
1	Mercurio	Hg	55	10
1	Plomo	Pb	463	18

**Nota.** Primera medición de la muestra del relave minero de la cáscara de yuca amarilla.

Para la muestra con cascara amarilla, se evidencia que, para el cobre y plomo, los resultados obtenidos son alto, para el mercurio, metal de interés, en comparación a los otros metales no se encuentra en gran proporción.

### Medición 2:

**Tabla 16.**

*Segunda medición del relave minero.*

Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
2	Hierro	Fe	8,28%	0,14
2	Cobre	Cu	634	33
2	Zinc	Zn	339	21
2	Arsénico	As	167	18
2	Rubidio	Rb	32	6
2	Estroncio	Sr	37	2
2	Circonio	Zr	89	4
2	Mercurio	Hg	42	12

**Nota.** Segunda medición de la muestra del relave minero de la cáscara de yuca amarilla.

En esta sección de la muestra, se presenta aumento en los resultados de la mayoría de los metales, el Titanio sigue siendo el elemento predominante.

### Medición 3:

**Tabla 17.**

*Tercera medición del relave minero.*

<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
<b>3</b>	<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	<b>6,74%</b>	<b>0,11</b>
<b>3</b>	<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	<b>559</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	<b>291</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	<b>131</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	<b>36</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	<b>35</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	<b>102</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	<b>39</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	<b>338</b>	<b>15</b>

**Nota.** Tercera medición de la muestra del relave minero de la cáscara de yuca amarilla.

Para la tercera medición con cascará amarga los resultados obtenidos de mercurio disminuyeron significativamente frente a las dos mediciones realizadas anteriormente.

### **Promedio metales pesados**

Con las tres mediciones realizadas se obtiene un promedio el cual determina el resultado final de la muestra de relave minero con la cáscara de yuca amarga:

**Tabla 18.**

*Promedio de las tres mediciones.*

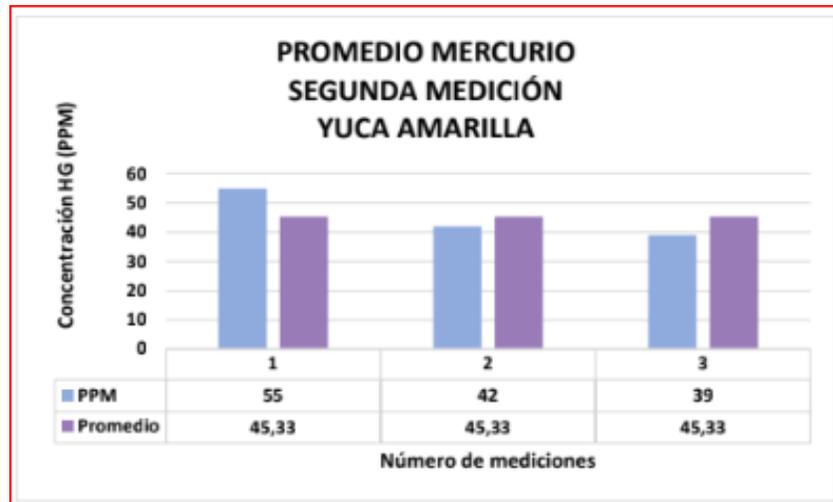
<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	0,08	0,13
<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	602,00	30,67
<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	342,67	20,00
<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	168,67	16,33
<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	32,67	4,00
<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	36,67	2,67
<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	93,67	5,33
<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	45,33	10,67
<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	424,67	17,67

**Nota.** Promedio de las mediciones del relave minero y la cáscara de yuca amarilla.

Se evidencia aumento en la concentración de algunos metales, para el caso de esta muestra, en todos los puntos en los que se realizó la medición se detectó presencia de titanio, para el caso de estas mediciones, como se explicó anteriormente, la muestra era removida cada dos días, de esta manera, se garantizaba la homogenización de la muestra, al momento de interactuar con el relave o que este reciba algún cambio físico o químico, la concentración en los metales presenta una modificación como sucedió en el caso del titanio.

**Figura 46.**

*Promedio de las concentraciones segunda medición.*



**Nota.** Promedio de las concentraciones de mercurio de la segunda medición para la cáscara de yuca amarilla.

Para el caso del mercurio, metal a remediar, se obtiene un promedio de concentración de 45,33 ppm, a pesar de que la absorción para este caso no fue tan significativa, debido a que el tiempo de remediación no fue tan prolongado se observa que mediante la cascara *Manihot esculenta*, si se genera una disminución en la concentración de mercurio.

### **5.2.2 Cáscara de yuca blanca**

**Medición 1:**

**Tabla 19.**

*Primera medición de la muestra del relave minero.*

<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
1	Hierro	Fe	8,24%	0,13
1	Cobre	Cu	604	30
1	Zinc	Zn	279	18
1	Arsénico	As	156	14
1	Rubidio	Rb	32	3
1	Estroncio	Sr	45	3
1	Circonio	Zr	148	7
1	Mercurio	Hg	51	10
1	Plomo	Pb	320	15

**Nota.** Primera medición muestra del relave minero y cáscara de yuca blanca.

**Medición 2:**

**Tabla 20.**

*Segunda medición de la muestra del relave minero.*

<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
2	Hierro	Fe	7,39%	0,14
2	Cobre	Cu	624	36
2	Zinc	Zn	320	22
2	Arsénico	As	167	18
2	Rubidio	Rb	30	3
2	Estroncio	Sr	42	4
2	Circonio	Zr	106	7
2	Mercurio	Hg	47	13
2	Plomo	Pb	371	19

**Nota.** Segunda medición muestra del relave minero y cáscara de yuca blanca.

### Medición 3:

**Tabla 21.**

*Tercera medición de la muestra del relave minero.*

Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
3	Hierro	Fe	8,41%	0,13
3	Cobre	Cu	661	31
3	Zinc	Zn	308	18
3	Arsénico	As	160	14
3	Rubidio	Rb	37	3
3	Estroncio	Sr	-	-
3	Circonio	Zr	-	-
3	Mercurio	Hg	33	10
3	Plomo	Pb	351	15

**Nota.** Tercera medición muestra del relave minero y cáscara de yuca blanca.

En el caso de la última medición no se tuvo presencia de los elementos estroncio y circonio, en cuanto al mercurio, el resultado disminuyo frente a las otras dos mediciones realizadas.

### Promedio metales pesados:

Con las tres mediciones realizadas se obtiene un promedio el cual determina el resultado final de la muestra de relave minero con yuca dulce:

**Tabla 22.**

*Tabla de promedios de las concentraciones.*

Metal	Subfijo	PPM	+/-
Hierro	Fe	0,08	0,13
Cobre	Cu	629,67	32,33
Zinc	Zn	302,33	19,33

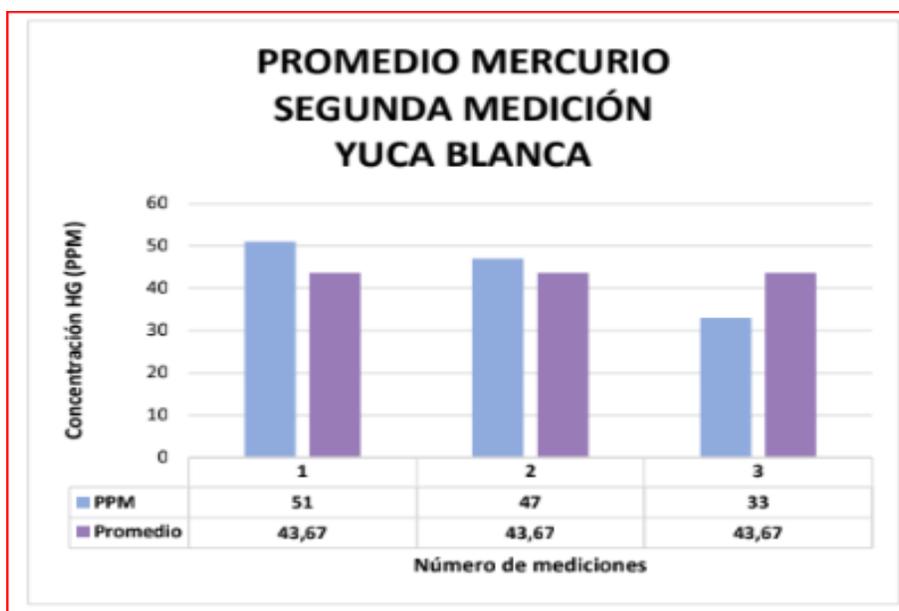
**Nota.** Promedio de las tres mediciones de relave y yuca blanca.

**Tabla 22.**  
(Continuación).

<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	161,00	15,33
<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	33,00	3,00
<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	29,00	2,33
<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	84,67	4,67
<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	43,67	11,00
<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	347,33	16,33

**Nota.** Promedio de las tres mediciones de relave y yuca blanca.

**Figura 47.**  
Promedio del mercurio segunda medición.



**Nota.** Gráfica 3 – promedio concentraciones de mercurio segunda medición para cáscara de yuca blanca.

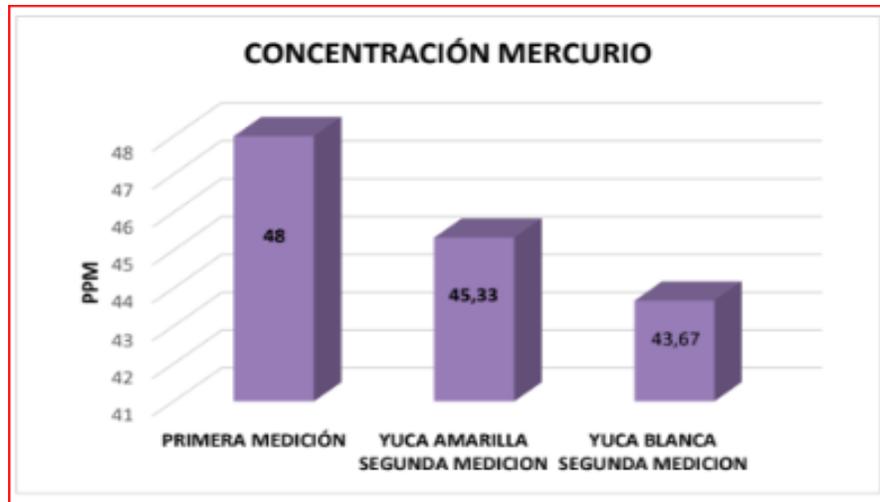
### 5.2.3 Análisis de mediciones del suelo contaminado

Para el primer análisis se tomaron las mediciones realizadas al suelo sin ningún tipo de intervención, para el segundo análisis, las mediciones se realizaron 3 meses después

como se mencionó anteriormente con la cascara de yuca amarga y dulce, en este caso, se realizaron las mediciones con dos yucas diferentes para determinar qué tipo de cascara cumple con el objetivo de adsorber mercurio del suelo contaminado:

**Figura 48.**

*Comparación de promedios.*



**Nota.** Gráfica 4 – comparación promedio obtenido en mediciones del suelo con respecto a la remoción de la *Manihot esculenta* amarilla y blanca.

En la gráfica se evidencia que la *Manihot esculenta* disminuyó la cantidad de mercurio que presente en el relave minero, a pesar de que no se observa una diferencia significativa, para el caso de la cascara de yuca dulce el resultado obtenido es mejor a comparación de la yuca amarga.

### 5.3 Tercera medición en la muestra del suelo contaminado

Para el caso de esta medición, se adicionó a las muestras determinada cantidad de carbón activado, esto con el fin de acelerar el proceso de remoción de los metales, debido al poco tiempo que se tiene para obtener resultados del presente proyecto; como se ha explicado en capítulos anteriores, la muestra de suelo se dividió en 4 partes, 2 partes con cascara de yuca dulce y las otras 2 con cascara de yuca dulce, para esta parte del

proyecto adicionaremos 50g de carbón activado en una de las partes que contiene cascara de yuca dulce y amarga y 100g para las otras dos partes de las muestras con la cascara de yuca dulce y amarga.

<b>Tiempo</b>	30 Seg
<b>Fecha</b>	29 de mayo del 2023

### 5.3.1 Cáscara de yuca amarilla con 50g de biocarbon

**Medición 1:**

**Tabla 23.**

*Primera medición de cáscara de yuca amarilla con biocarbon.*

<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
1	Hierro	Fe	57,6	0,5
1	Cobre	Cu	479	35
1	Zinc	Zn	413	26
1	Arsénico	As	227	21
1	Rubidio	Rb	32	4
1	Estroncio	Sr	86	5
1	Circonio	Zr	48	4
1	Mercurio	Hg	27	9
1	Plomo	Pb	388	21
<b>1 MEDICIÓN</b>	<b>50 g</b>			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

### Medición 2:

**Tabla 24.**

*Segunda medición de cáscara de yuca amarilla con biocarbon.*

<b>YUCA AMARILLA</b>				
<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
2	Hierro	Fe	11,7	0,2
2	Cobre	Cu	186	19
2	Zinc	Zn	415	20
2	Arsénico	As	124	11
2	Rubidio	Rb	13	2
2	Estroncio	Sr	143	5
2	Circonio	Zr	25	3
2	Mercurio	Hg	37	9
2	Plomo	Pb	130	10
<b>2 MEDICIÓN</b>	<b>50 g</b>			

**Nota.** Segunda medición muestra del relave minero y cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

### Medición 3:

**Tabla 25.**

*Tercera medición cáscara de yuca con biocarbon.*

<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
3	Hierro	Fe	8,41%	0,13
3	Cobre	Cu	661	31
3	Zinc	Zn	308	18
3	Arsénico	As	160	14
3	Rubidio	Rb	37	3
3	Estroncio	Sr	-	-
3	Circonio	Zr	-	-
3	Mercurio	Hg	33	10
3	Plomo	Pb	351	15

**Nota.** Tercera medición muestra del relave minero y cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

## Promedio metales pesados

**Tabla 26.**

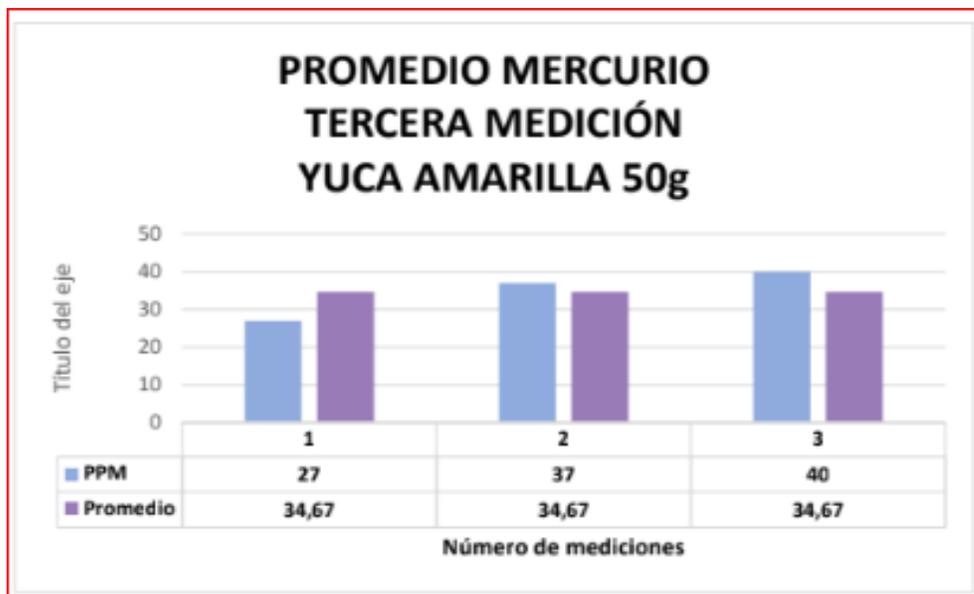
*Promedio de las mediciones del relave minero.*

Metal	Subfijo	PPM	+/-
Hierro	Fe	27,23	0,33
Cobre	Cu	407,33	29,33
Zinc	Zn	415,33	23,33
Arsénico	As	191,67	17,33
Rubidio	Rb	25,67	3,00
Estroncio	Sr	99,33	4,67
Circonio	Zr	44,33	3,67
Mercurio	Hg	34,67	9,00
Plomo	Pb	309,67	17,00

**Nota.** Promedio de las tres mediciones de relave de cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

**Figura 49.**

*Promedio de concentraciones del mercurio.*



**Nota.** Gráfica 5 promedio concentración de mercurio tercera medición para cáscara de yuca amarilla con 50g de carbón activado.

### 5.3.2 Cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon

#### Medición 1:

Tabla 27.

Primera medición cáscara de yuca amarilla con biocarbon.

<b>CÁSCARA YUCA AMARILLA</b>				
<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
1	Hierro	Fe	13,6	0,7
1	Cobre	Cu	435	29
1	Zinc	Zn	359	21
1	Arsénico	As	192	16
1	Rubidio	Rb	27	3
1	Estroncio	Sr	81	4
1	Circonio	Zr	44	4
1	Mercurio	Hg	17	7
1	Plomo	Pb	288	16
<b>1 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

#### Medición 2:

Tabla 28.

Segunda medición cáscara de yuca amarilla con biocarbon.

<b>YUCA AMARILLA</b>				
<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
<b>2</b>	<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	<b>11,3</b>	<b>0,7</b>
<b>2</b>	<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	<b>555</b>	<b>34</b>
<b>2</b>	<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	<b>431</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	<b>222</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	<b>32</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	<b>63</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	<b>79</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	<b>25</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	<b>349</b>	<b>19</b>
<b>2 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Segunda medición de cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

### Medición 3:

Tabla 29.

*Tercera medición cáscara de yuca amarilla con biocarbon.*

YUCA AMARILLA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
3	Hierro	Fe	14,2	0,9
3	Cobre	Cu	507	32
3	Zinc	Zn	405	23
3	Arsénico	As	225	18
3	Rubidio	Rb	33	3
3	Estroncio	Sr	88	4
3	Circonio	Zr	67	4
3	Mercurio	Hg	26	9
3	Plomo	Pb	311	17
3 MEDICIÓN	100 g			

*Nota.* Tercera medición de cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

### Promedio metales pesados

Tabla 30.

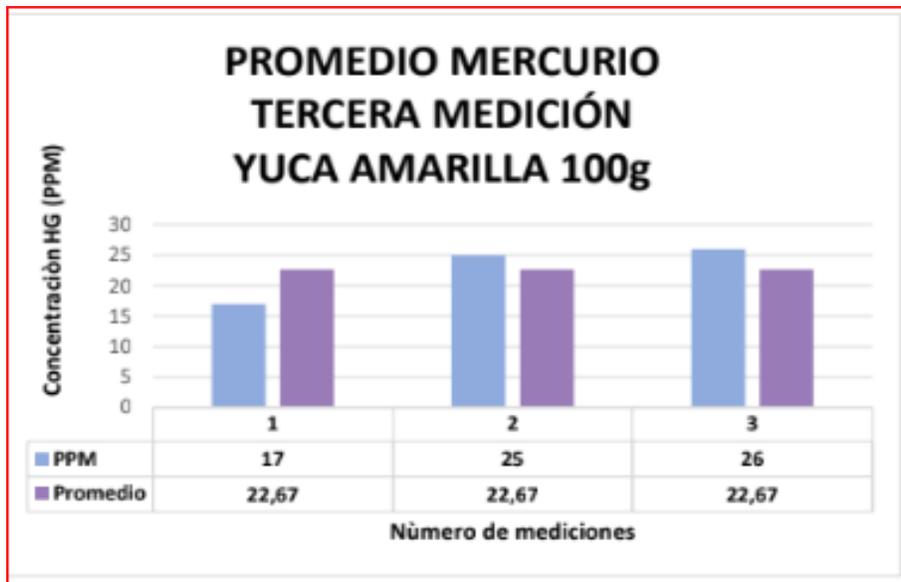
*Promedio de las tres mediciones.*

Metal	Subfijo	PPM	+/-
Hierro	Fe	13,03	0,77
Cobre	Cu	499,00	31,67
Zinc	Zn	398,33	22,67
Arsénico	As	213,00	17,67
Rubidio	Rb	30,67	3,00
Estroncio	Sr	77,33	4,00
Circonio	Zr	63,33	4,00
Mercurio	Hg	22,67	8,33
Plomo	Pb	316,00	17,33

*Nota.* Promedio de las tres mediciones de relave minero con cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

**Figura 50.**

*Promedio de concentraciones de mercurio.*



**Nota.** Promedio de las tres mediciones de relave minero con cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

### Promedio medición mercurio y biocarbon

De los datos obtenidos por medio de la cascara de yuca amarilla con 50g y 100g de carbón activado, se obtuvo un promedio para la yuca amarilla:

**Tabla 31.**

*Promedio obtenido de la cáscara de yuca amarilla.*

Mercurio		
Mediciones	PPM	Promedio (PPM)
Cáscara de yuca amarilla + 50 g Biocarbon	34,67	28,67
Cáscara de yuca amarilla + 100 g Biocarbon	22,67	28,67

**Nota.** Promedio obtenido para la cáscara de yuca amarilla con 50 y 100 g de biocarbon.

### 5.3.3 Cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon

#### Medición 1:

Tabla 32.

Primera medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	26	0,2
1	Cobre	Cu	685	39
1	Zinc	Zn	439	26
1	Arsénico	As	251	20
1	Rubidio	Rb	31	4
1	Estroncio	Sr	42	3
1	Circonio	Zr	71	4
1	Mercurio	Hg	37	10
1	Plomo	Pb	330	19
1 MEDICIÓN	50 g			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

#### Medición 2:

Tabla 33.

Segunda medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
2	Hierro	Fe	15,6	0,8
2	Cobre	Cu	525	33
2	Zinc	Zn	400	23
2	Arsénico	As	210	17
2	Rubidio	Rb	27	3
2	Estroncio	Sr	54	3
2	Circonio	Zr	73	4
2	Mercurio	Hg	24	8
2	Plomo	Pb	268	16
2 MEDICIÓN	50 g			

**Nota.** Segunda medición de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

#### Medición 3:

**Tabla 34.**

*Tercera medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

<b>YUCA BLANCA</b>				
<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
3	Hierro	Fe	11,3	0,5
3	Cobre	Cu	374	27
3	Zinc	Zn	312	19
3	Arsénico	As	177	14
3	Rubidio	Rb	23	3
3	Estroncio	Sr	45	3
3	Circonio	Zr	39	3
3	Mercurio	Hg	15	7
3	Plomo	Pb	199	13
<b>3 MEDICIÓN</b>	<b>50 g</b>			

**Nota.** Tercera medición de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

### Promedio de los metales

**Tabla 35.**

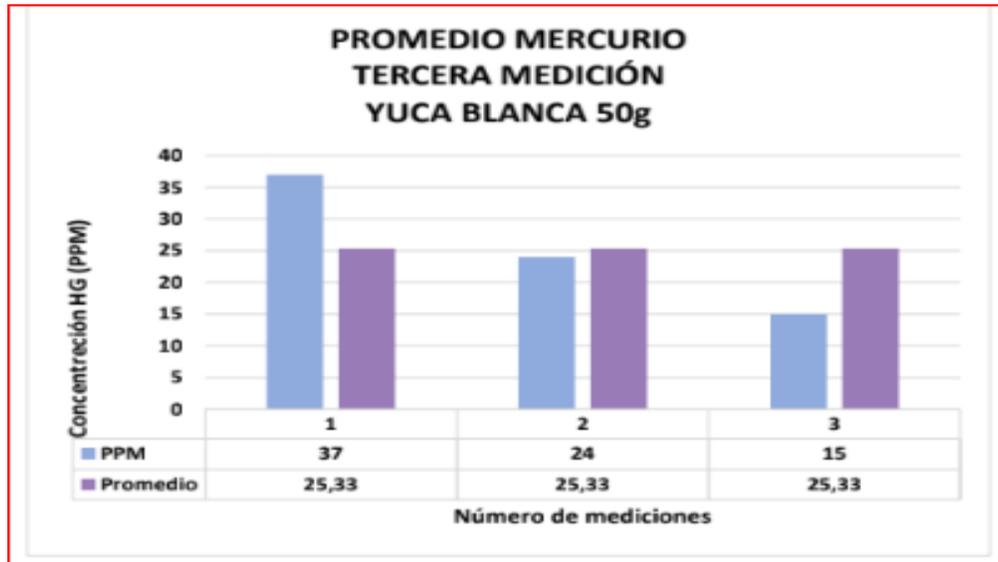
*Promedio de las tres mediciones.*

<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
Hierro	Fe	17,63	0,50
Cobre	Cu	528,00	33,00
Zinc	Zn	383,67	22,67
Arsénico	As	212,67	17,00
Rubidio	Rb	27,00	3,33
Estroncio	Sr	47,00	3,00
Circonio	Zr	61,00	3,67
Mercurio	Hg	25,33	8,33
Plomo	Pb	265,67	16,00

**Nota.** Promedio de las tres mediciones del relave con cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

**Figura 51.**

*Promedio de las concentraciones del mercurio.*



**Nota.** Promedio concentraciones de mercurio tercera medición para la cáscara de yuca blanca con 50 g biocarbon.

### 5.3.4 Cáscara de yuca blanca 100 g de biocarbon

**Medición 1:**

**Tabla 36.**

*Primera medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	13,8	0,2
1	Cobre	Cu	521	22
1	Zinc	Zn	467	26
1	Arsénico	As	296	22
1	Rubidio	Rb	31	4
1	Estroncio	Sr	60	4
1	Circonio	Zr	60	4
1	Mercurio	Hg	36	10
1	Plomo	Pb	423	21
<b>1 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

**Medición 2:**

**Tabla 37.**

*Segunda medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
2	Hierro	Fe	16,3	0,6
2	Cobre	Cu	536	33
2	Zinc	Zn	427	24
2	Arsénico	As	247	20
2	Rubidio	Rb	27	3
2	Estroncio	Sr	75	4
2	Circonio	Zr	64	4
2	Mercurio	Hg	20	8
2	Plomo	Pb	389	20
<b>2 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Segunda medición de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

**Medición 3:**

**Tabla 38.**

*Tercera medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
3	Hierro	Fe	22,1	0,6
3	Cobre	Cu	423	29
3	Zinc	Zn	385	22
3	Arsénico	As	209	17
3	Rubidio	Rb	29	3
3	Estroncio	Sr	76	4
3	Circonio	Zr	71	4
3	Mercurio	Hg	14	8
3	Plomo	Pb	304	17
<b>3 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Tercera medición de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

## Promedio metales pesados

**Tabla 39.**

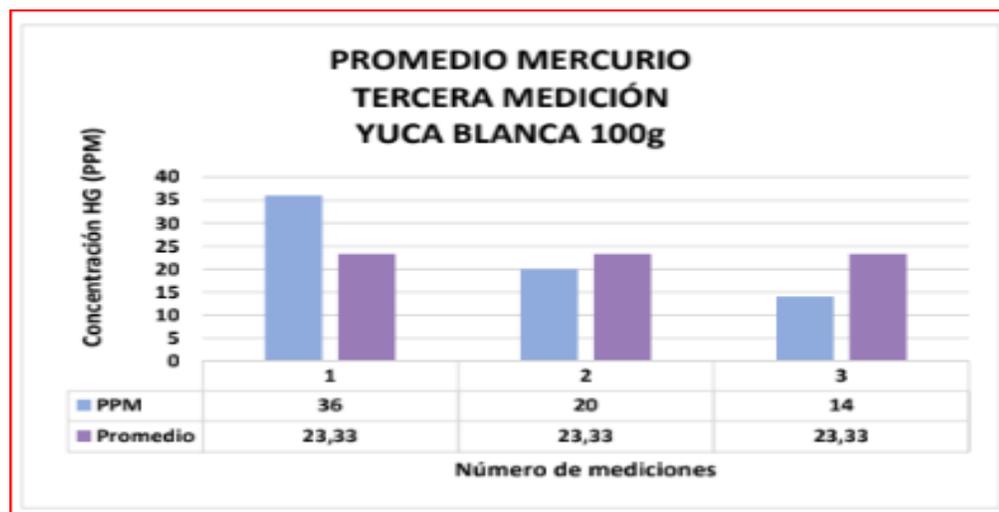
*Promedio de las tres mediciones.*

Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	17,40	0,47
1	Cobre	Cu	493,33	28,00
1	Zinc	Zn	426,33	24,00
1	Arsénico	As	250,67	19,67
1	Rubidio	Rb	29,00	3,33
1	Estroncio	Sr	70,33	4,00
1	Circonio	Zr	65,00	4,00
1	Mercurio	Hg	23,33	8,67
1	Plomo	Pb	372,00	19,33

**Nota.** Promedio de las tres mediciones del relave de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

**Figura 52.**

*Promedio de concentraciones de mercurio.*



**Nota.** Gráfica 8 – promedio concentración de mercurio tercera medición para cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

## Promedio medición mercurio y biocarbon:

**Tabla 40.**

*Promedio obtenido de la tercera medición.*

Mercurio		
MEDICIONES	PPM	PROMEDIO (PPM)
YUCA BLANCA + 50g CARBON ACTIVADO	25,33	24,33
YUCA BLANCA + 100g CARBON ACTIVADO	23,33	24,33

**Nota.** Promedio obtenido de la tercera medición para la cáscara de yuca blanca con 50 y 100 g de biocarbon.

## 5.4 Cuarta medición en la muestra de suelo contaminado

<b>Tiempo</b>	30 Seg
<b>Fecha</b>	5 de junio

### 5.4.1 Cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon

#### Medición 1:

**Tabla 41.**

*Primera medición de cáscara de yuca amarilla con biocarbon.*

YUCA AMARILLA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	60,5k	0,5k
1	Cobre	Cu	536	34
1	Zinc	Zn	456	25
1	Arsénico	As	250	20
1	Rubidio	Rb	28	3
1	Estroncio	Sr	80	4
1	Circonio	Zr	74	4
1	Mercurio	Hg	25	9
1	Plomo	Pb	401	20
1 MEDICIÓN	50 g			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

### Medición 2:

Tabla 42.

Segunda medición de cáscara de yuca amarilla con biocarbon.

YUCA AMARILLA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
2	Hierro	Fe	68,3k	0,5k
2	Cobre	Cu	606	33
2	Zinc	Zn	511	27
2	Arsénico	As	256	20
2	Rubidio	Rb	34	4
2	Estroncio	Sr	84	4
2	Circonio	Zr	65	4
2	Mercurio	Hg	34	9
2	Plomo	Pb	363	19
<b>2 MEDICIÓN</b>	50 g			

**Nota.** Segunda medición de cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

### Medición 3:

Tabla 43.

Tercera medición de cáscara de yuca amarilla con biocarbon.

CÁSCARA YUCA AMARILLA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
3	Hierro	Fe	67,5k	0,5k
3	Cobre	Cu	639	36
3	Zinc	Zn	499	26
3	Arsénico	As	271	21
3	Rubidio	Rb	35	4
3	Estroncio	Sr	55	4
3	Circonio	Zr	84	5
3	Mercurio	Hg	29	9
3	Plomo	Pb	419	20
<b>3 MEDICIÓN</b>	50 g			

**Nota.** Tercera medición de cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

**Promedio metales pesados:**

**Tabla 44.**

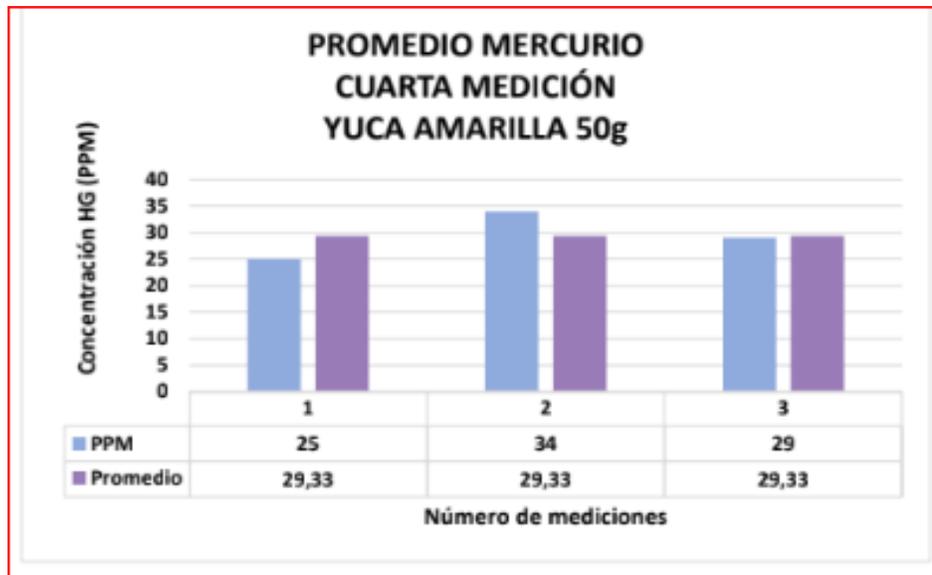
*Promedio de las tres mediciones con cáscara de yuca amarilla y biocarbon.*

YUCA AMARILLA			
Metal	Subfijo	PPM	+/-
Hierro	Fe	65,43k	0,5k
Cobre	Cu	593,67	34,33
Zinc	Zn	488,67	26,00
Arsénico	As	259,00	20,33
Rubidio	Rb	32,33	3,67
Estroncio	Sr	73,00	4,00
Circonio	Zr	74,33	4,33
Mercurio	Hg	29,33	9,00
Plomo	Pb	394,33	19,67
<b>50 g CARBON ACTIVADO</b>			

**Nota.** Promedio de las tres mediciones de relave con cáscara de yuca amarilla y 50 g de biocarbon.

**Figura 53.**

*Promedio concentración de mercurio con cáscara de yuca amarilla y biocarbon.*



**Nota.** Gráfica 9 – promedio concentración de mercurio cuarta medición de cáscara de yuca amarilla con 50 g de biocarbon.

#### 5.4.2 Cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon

##### Medición 1:

**Tabla 45.**

*Primera medición de cáscara de yuca amarilla y biocarbon.*

YUCA AMARILLA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	61,9 k	177
1	Cobre	Cu	51	33
1	Zinc	Zn	441	25
1	Arsénico	As	228	19
1	Rubidio	Rb	32	4
1	Estroncio	Sr	90	4
1	Circonio	Zr	72	4
1	Mercurio	Hg	33	9
1	Plomo	Pb	358	19
<b>1 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

##### Medición 2:

**Tabla 46.**

*Segunda medición de cáscara de yuca amarilla y biocarbon.*

YUCA AMARILLA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
2	Hierro	Fe	62,3 k	0,5 k
2	Cobre	Cu	554	34
2	Zinc	Zn	453	24
2	Arsénico	As	229	21
2	Rubidio	Rb	31	3
2	Estroncio	Sr	73	4
2	Circonio	Zr	49	4
2	Mercurio	Hg	28	9
2	Plomo	Pb	507	22
<b>2 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Segunda medición de cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

### Medición 3:

**Tabla 47.**

*Tercera medición de cáscara de yuca amarilla y biocarbon.*

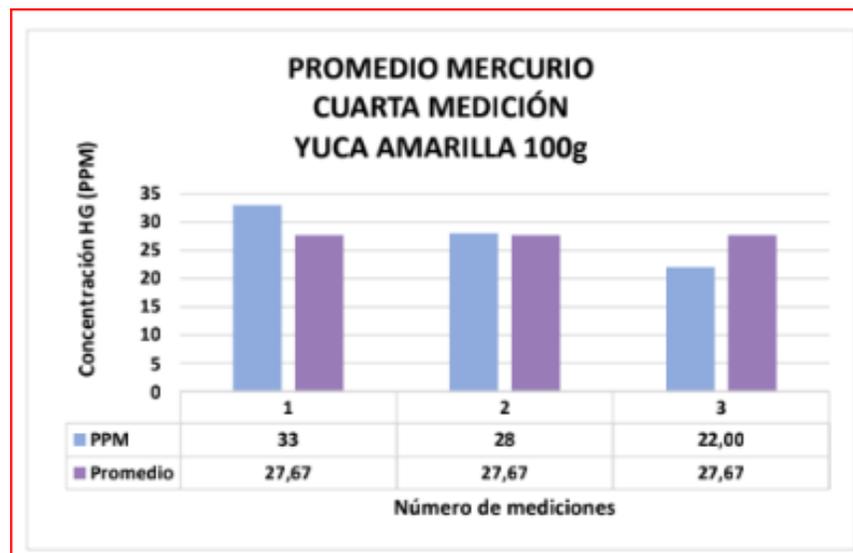
CÁSCARA YUCA AMARILLA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
3	Hierro	Fe	52,66k	0,4k
3	Cobre	Cu	517	32
3	Zinc	Zn	444	24
3	Arsénico	As	275	19
3	Rubidio	Rb	30	3
3	Estroncio	Sr	72	4
3	Circonio	Zr	57	4
3	Mercurio	Hg	22	8
3	Plomo	Pb	378	19
<b>3 MEDICIÓN</b>	100 g			

**Nota.** Tercera medición de cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

### Promedio metales pesados:

**Figura 54.**

*Promedio de las tres mediciones.*



**Nota.** Gráfica 10 – promedio concentraciones de mercurio cuarta medición para cáscara de yuca amarilla con 100 g de biocarbon.

## Promedio medición mercurio y biocarbon:

**Tabla 48.**

*Promedio obtenido por la cuarta medición.*

Mercurio		
MEDICIONES	PPM	PROMEDIO (PPM)
YUCA AMARILLA + 50g CARBON ACTIVADO	29,33	28,5
YUCA AMARILLA + 100g CARBON ACTIVADO	27,67	28,5

**Nota.** Promedio obtenido para la cuarta medición de cáscara de yuca amarilla con 50 y 100 g de biocarbon.

### 5.4.3 Cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon

#### Medición 1:

**Tabla 49.**

*Primera medición cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	71,1k	0,6k
1	Cobre	Cu	657	38
1	Zinc	Zn	419	27
1	Arsénico	As	258	22
1	Rubidio	Rb	34	4
1	Estroncio	Sr	42	3
1	Circonio	Zr	69	4
1	Mercurio	Hg	21	10
1	Plomo	Pb	476	23
1 MEDICIÓN	50 g			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

#### Medición 2:

**Tabla 50.**

*Segunda medición cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

<b>CÁSCARA YUCA BLANCA</b>				
<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
2	Hierro	Fe	70,6k	0,5k
2	Cobre	Cu	551	25
2	Zinc	Zn	457	25
2	Arsénico	As	221	9
2	Rubidio	Rb	34	4
2	Estroncio	Sr	47	3
2	Circonio	Zr	49	4
2	Mercurio	Hg	28	9
2	Plomo	Pb	354	19
<b>2 MEDICIÓN</b>	<b>50 g</b>			

**Nota.** Segunda medición de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

### Medición 3:

**Tabla 51.**

*Tercera medición cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

<b>YUCA BLANCA</b>				
<b>Medición</b>	<b>Metal</b>	<b>Subfijo</b>	<b>PPM</b>	<b>+/-</b>
<b>3</b>	<b>Hierro</b>	<b>Fe</b>	<b>710,2k</b>	<b>0,5k</b>
<b>3</b>	<b>Cobre</b>	<b>Cu</b>	<b>598</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>Zinc</b>	<b>Zn</b>	<b>405</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>Arsénico</b>	<b>As</b>	<b>222</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>Rubidio</b>	<b>Rb</b>	<b>29</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Estroncio</b>	<b>Sr</b>	<b>44</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Circonio</b>	<b>Zr</b>	<b>91</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Mercurio</b>	<b>Hg</b>	<b>20</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Plomo</b>	<b>Pb</b>	<b>400</b>	<b>20</b>
<b>3 MEDICIÓN</b>	<b>50 g</b>			

**Nota.** Tercera medición de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

## Promedio metales pesados:

Tabla 52.

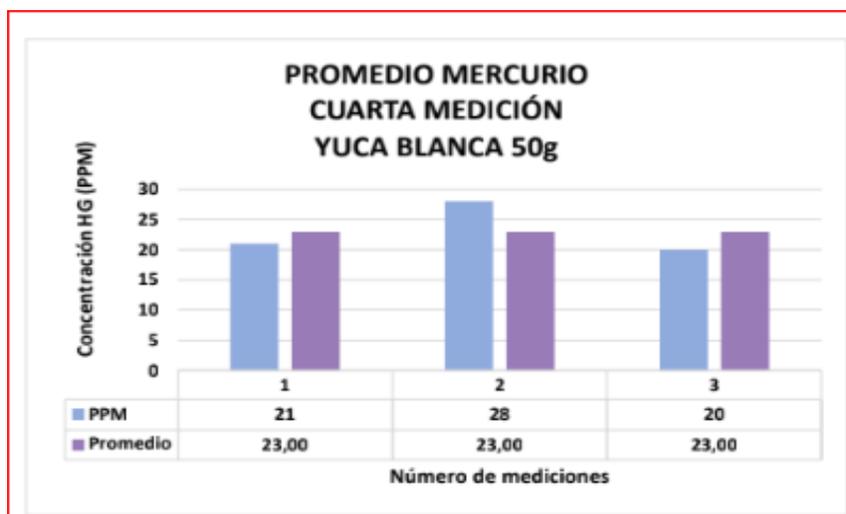
Promedio de las tres mediciones.

YUCA BLANCA			
Metal	Subfijo	PPM	+/-
Hierro	Fe	283,97k	0,53k
Cobre	Cu	602,00	33,00
Zinc	Zn	427,00	25,33
Arsénico	As	233,67	17,00
Rubidio	Rb	32,33	3,67
Estroncio	Sr	44,33	3,00
Circonio	Zr	69,67	4,33
Mercurio	Hg	23,00	9,33
Plomo	Pb	410,00	20,67
50 g CARBON ACTIVADO			

**Nota.** Promedio de las tres mediciones de relave de cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

Figura 55.

Promedio de concentraciones de mercurio.



**Nota.** Promedio concentración de mercurio cuarta medición para cáscara de yuca blanca con 50 g de biocarbon.

### 5.4.4 Cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon

### Medición 1:

**Tabla 53.**

*Primera medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
1	Hierro	Fe	64,1k	0,5k
1	Cobre	Cu	560	34
1	Zinc	Zn	426	24
1	Arsénico	As	246	19
1	Rubidio	Rb	26	3
1	Estroncio	Sr	51	3
1	Circonio	Zr	71	3
1	Mercurio	Hg	25	9
1	Plomo	Pb	379	19
<b>1 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Primera medición de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

### Medición 2:

**Tabla 54.**

*Segunda medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
2	Hierro	Fe	58,8k	0,5k
2	Cobre	Cu	525	33
2	Zinc	Zn	402	23
2	Arsénico	As	217	19
2	Rubidio	Rb	29	3
2	Estroncio	Sr	62	4
2	Circonio	Zr	71	4
2	Mercurio	Hg	24	9
2	Plomo	Pb	379	19
<b>2 MEDICIÓN</b>	<b>100 g</b>			

**Nota.** Segunda medición de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

### Medición 3:

**Tabla 55.**

*Tercera medición de cáscara de yuca blanca con biocarbon.*

YUCA BLANCA				
Medición	Metal	Subfijo	PPM	+/-
3	Hierro	Fe	57k	0,5k
3	Cobre	Cu	575	34
3	Zinc	Zn	418	23
3	Arsénico	As	212	17
3	Rubidio	Rb	30	3
3	Estroncio	Sr	59	4
3	Circonio	Zr	50	4
3	Mercurio	Hg	21	9
3	Plomo	Pb	292	17
<b>3 MEDICIÓN</b>		<b>100 g</b>		

**Nota.** Tercera medición de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

**Promedio metales pesados:**

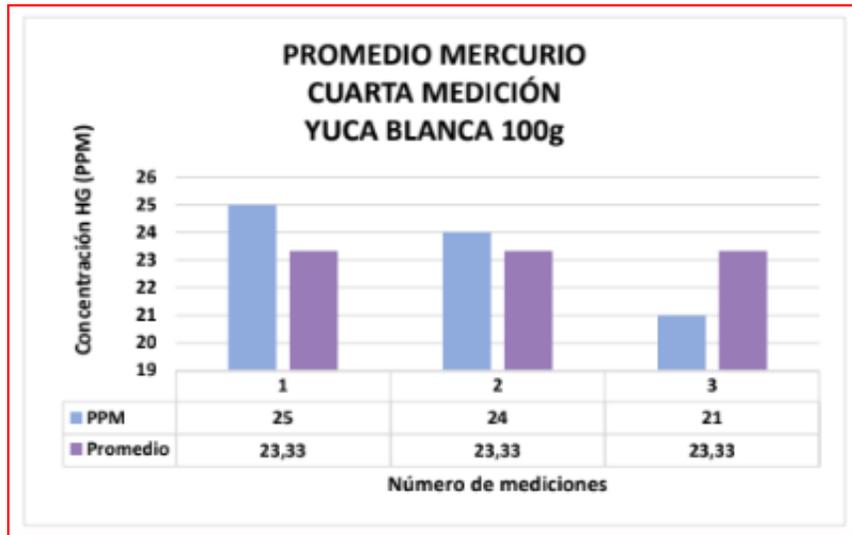
**Tabla 56.**

*Promedio de las mediciones de relave.*

Metal	Subfijo	PPM	+/-
Hierro	Fe	57k	0,5k
Cobre	Cu	553,3	33,67
Zinc	Zn	415,33	23,33
Arsénico	As	225,00	18,33
Rubidio	Rb	28,33	3,00
Estroncio	Sr	57,33	3,67
Circonio	Zr	64,00	9,00
Mercurio	Hg	23,33	8,33
Plomo	Pb	350,00	19,34
<b>100 g BIOCARBON</b>			

**Nota.** Promedio de las tres mediciones de relave de cáscara de yuca blanca con 100 g de biocarbon.

**Figura 56.**  
*Promedio de concentración de mercurio.*



**Nota.** Gráfica 12 – promedio concentración de Mercurio cuarta medición para cáscara de yuca blanca con 100g de biocarbon.

**Promedio medición mercurio y biocarbon:**

**Tabla 57.**  
*Promedio obtenido para la cuarta medición.*

Mercurio		
MEDICIONES	PPM	PROMEDIO (PPM)
YUCA BLANCA + 50g CARBON ACTIVADO	23	23,165
YUCA BLANCA + 100g CARBON ACTIVADO	23,33	23,165

**Nota.** Promedio obtenido para la cuarta medición de yuca blanca con 50 y 100 g de carbón activado.

## Remoción cáscara de yuca amarilla

**Tabla 58.**

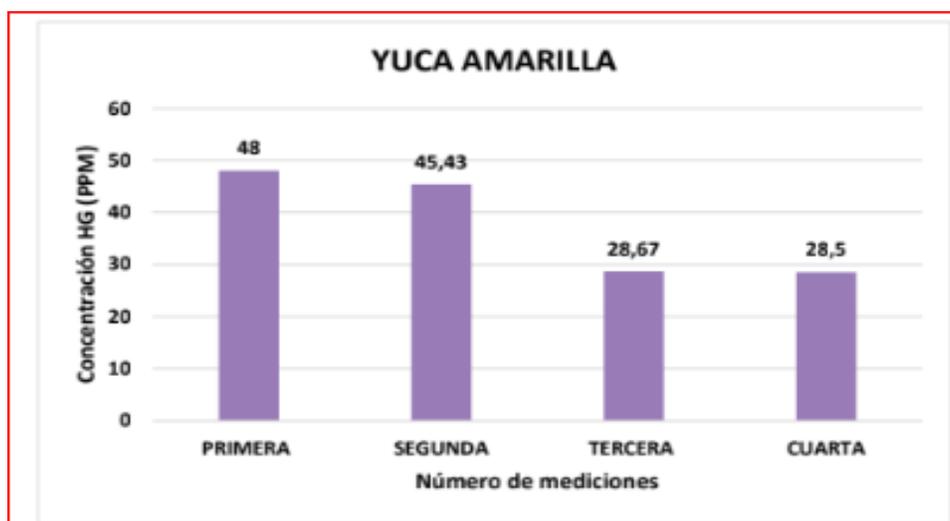
*Mediciones realizadas para la remediación.*

YUCA AMARILLA	
MEDICIONES	CONCENTRACIONES
PRIMERA	48
SEGUNDA	45,43
TERCERA	28,67
CUARTA	28,5

**Nota.** Número de mediciones realizadas para la remoción de mercurio mediante cáscara de yuca amarilla.

**Figura 57.**

*Concentraciones de mercurio de la cuarta medición.*



**Nota.** Gráfica 13 – concentraciones de mercurio obtenidas en las cuatro mediciones realizadas para la cáscara amarilla.

## Remoción cáscara de yuca blanca

**Tabla 59.**

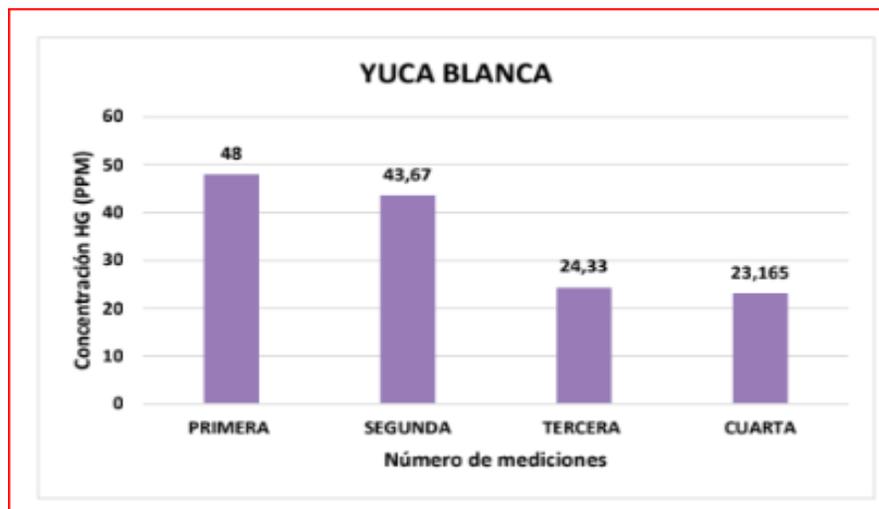
*Mediciones realizadas de mercurio.*

YUCA BLANCA	
MEDICIONES	CONCENTRACIONES
PRIMERA	48
SEGUNDA	43,67
TERCERA	24,33
CUARTA	23,165

**Nota.** Número de mediciones realizadas para la remediación de mercurio mediante cáscara de yuca blanca.

**Figura 58.**

*Concentraciones de mercurio.*



**Nota.** Gráfica 14 - concentraciones de mercurio obtenidas en las cuatro mediciones realizadas para la cáscara de yuca blanca

## 6. ANÁLISIS REMOCIÓN DE MERCURIO MEDIANTE *MANIHOT ESCULENTA*

Con respecto a las gráficas obtenidas para cada una de las mediciones realizadas a lo largo del proyecto, se logró evidenciar diferentes aspectos que ayudó a la remoción de mercurio en el relave minero.

En la primera medición, con respecto a la referencia de la tabla 13, se determinó la concentración inicial (ppm) del metal de interés, en este caso, se obtuvo una concentración de 48 ppm de mercurio. Teniendo en cuenta la tabla 3, se estipula que existe una contaminación del suelo cuando la concentración máxima de mercurio es de 23 ppm. Al conocer estos datos, nace la necesidad de implementar un método de remoción, que es el caso del proyecto, en donde se evalúa por medio de la cáscara *Manihot esculenta*.

Como se explicó en el capítulo 3, se tienen dos tipos de cáscara de yuca, yuca amarilla y yuca blanca, para el caso de la medición número dos, se realizó un esquema experimental, en el cual se dividió la muestra de suelo (1 kg) en cuatro partes iguales, donde, a dos partes del suelo se le adicionó 50g de cáscara de yuca amarilla y a las otras dos 50 g cáscara de yuca blanca. Este esquema se realizó con el fin de determinar cuál de los dos tipos de cáscara de yuca favorecen a la remoción del mercurio en el relave minero. Se realizaron 3 mediciones por muestra, para obtener un promedio de concentración (ppm), en el cual, realizando dichas mediciones en la muestra de suelo, no presenta homogeneidad en el relave minero por los diferentes puntos de concentración de los metales encontrados en el suelo.

Al observar el poco grado de disminución en la concentración de mercurio entre la primera medición y la segunda (3 ppm Hg), se procedió a realizar un laboratorio de materia orgánica en el suelo, para determinar qué factores estaban interviniendo en la remoción de mercurio, por lo cual, se obtuvo las respectivas curvas de absorbancia e indicadores colorimetría indicando el grado de permanencia de materia orgánica en el suelo. Se observó, que existe una cantidad de materia orgánica significativa que interviene en la adsorbancia de los metales pesados encontrados en el suelo [87], en

este caso, se analiza desde dos aspectos, inicialmente por la cantidad de arcilla contenida en el suelo, en el cual, anteriormente se menciona que la muestra del suelo contiene 30% aproximadamente de arcilla, por lo que es de gran importancia para la relación ya que esta ayuda al equilibrio y estabilidad de la materia orgánica por su estructura molecular presente en el suelo [88]. Por otra parte, la relación que existe entre la solubilidad de los metales pesados con respecto a la adsorbancia, ya que, se evidencia que la materia orgánica no afecta en la adsorbancia del mercurio, sin embargo, sí con respecto al cobre, plomo y zinc, debido a la biodisponibilidad que estos presentan para el suelo [89] mientras que el mercurio no brinda dicha biodisponibilidad.

Con respecto a la solubilidad del mercurio en los suelos, depende de varios factores, uno de ellos es el pH del suelo y estipular su grado de alcalinidad. Esto se debe a que el mercurio presenta mayor solubilidad en un pH por encima de 5, por ende, al existir mayor cantidad de grupos hidroxilos OH-1 mayor afinidad tiene el mercurio para la formación de otros compuestos y/o sales que pueden llegar a aumentar su solubilidad [90].

Por las posibles alteraciones de la remoción de la cáscara de yuca con respecto a la remoción del suelo, se estipula la adición de carbón activado para la aceleración de remoción en el suelo. El cual se referencia en la tabla 21 para la toma de nuevas mediciones del suelo con respecto al añadir el agente externo del carbón activado. Se añade 50 g de carbón activado para una parte de la muestra del suelo de la yuca blanca y una parte para la muestra del suelo de la yuca amarilla y así mismo con otra adición de carbón activado pero una cantidad de 100g. Como se presenta en la siguiente imagen:

### Figura 59.

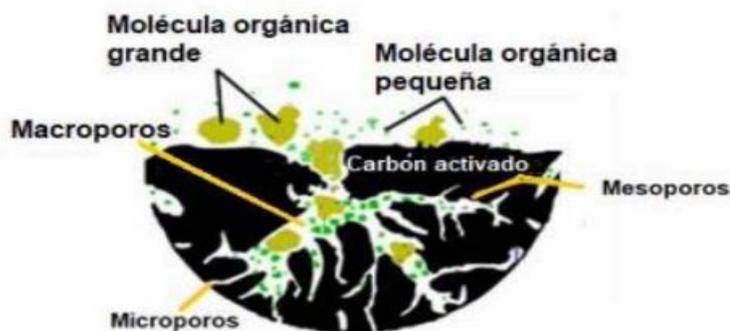
*Muestra del suelo de relave minero.*



**Nota.** Muestra del suelo del relave minero con adición de cáscaras de yuca y biocarbon.

Al obtener las mediciones de la concentración de los metales con la adición de carbón activado, se evidencio la reducción de mercurio y demás metales en el suelo, como se presenta en la tabla 36. Donde se observa que la cantidad de carbón activado varia con respecto a la remoción de mercurio, entre menor cantidad de carbono menor remoción hay en la concentración del mercurio, más, sin embargo, se evidencia la remoción de mercurio ya sea para la cantidad de 50 g carbón activado como para la cantidad 100 g de carbón activado. Esto es debido a la adsorción que cumple el carbón con respecto a la afinidad del suelo, para este caso el carbón activado cumple con una adsorción química, la cual, existe una fuerza de valencia con los enlaces covalentes presentes en la interacción del suelo con los metales pesados y el carbón. Dado a que la partícula de carbón es muy pequeña, generando un mayor contacto con el suelo formando una mayor afinidad con los metales presentes en el suelo, mientras exista una menor distancia entre el carbón y el metal mayor energía de activación existe en la interacción proporcionando una estabilidad en el enlace del carbón y metal (en este caso del mercurio), además de ello, se tiene en cuenta la porosidad del carbón, ya que por su estructura atrae el metal (por lo anteriormente mencionado) cumple con la retención de mercurio en sus paredes [91], como se presenta a continuación:

**Figura 60.**  
*Representación gráfica del biocarbon.*



**Nota.** Representación gráfica del proceso de transporte y adsorción de moléculas orgánicas. Tomado de: Román, I. G. E. ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA ESTRUCTURA Y REACTIVIDAD DE MATERIALES POROSOS Y SU INTERACCIÓN CON MOLÉCULAS DE INTERÉS FARMACÉUTICO. Edu.ar

Finalmente, se realizó una última medición en el cual se retiró las cáscaras de yuca amarilla y las cáscaras de yuca blanca, esto con el fin de evidenciar que al tener la presencia de la cáscara de yuca al tomar las mediciones con el equipo XRF capte el mercurio presente en las cáscaras de yuca. Al remover las cascara se evidencio la disminució de la presencia de la concentracón de mercurio, no existe una disminució significativa, pero si se observó menor grado de concentracón tal como se muestra en la tabla 58.

Sin embargo, con lo anteriormente mencionado, se tiene en cuenta otro factor en la eficiencia de remoción y es por parte de la cáscara de yuca con base al tipo de yuca, que, para este caso es el tipo de yuca amarilla (dulce) y el tipo de yuca blanca (amarga). Al obtener los resultados finales de remoción se evidencia que la muestra del suelo de la cáscara de yuca blanca obtuvo mayor grado de remoción de mercurio, en comparacón a la cáscara de la yuca amarilla. Esto se debe a que, en la cáscara blanca se presenta una mayor concentracón de glúcidos cianogénicos en comparacón de la cáscara amarilla, esto se debe por su composición molecular mencionada en el capítulo 3 presente en la cáscara de yuca [92].

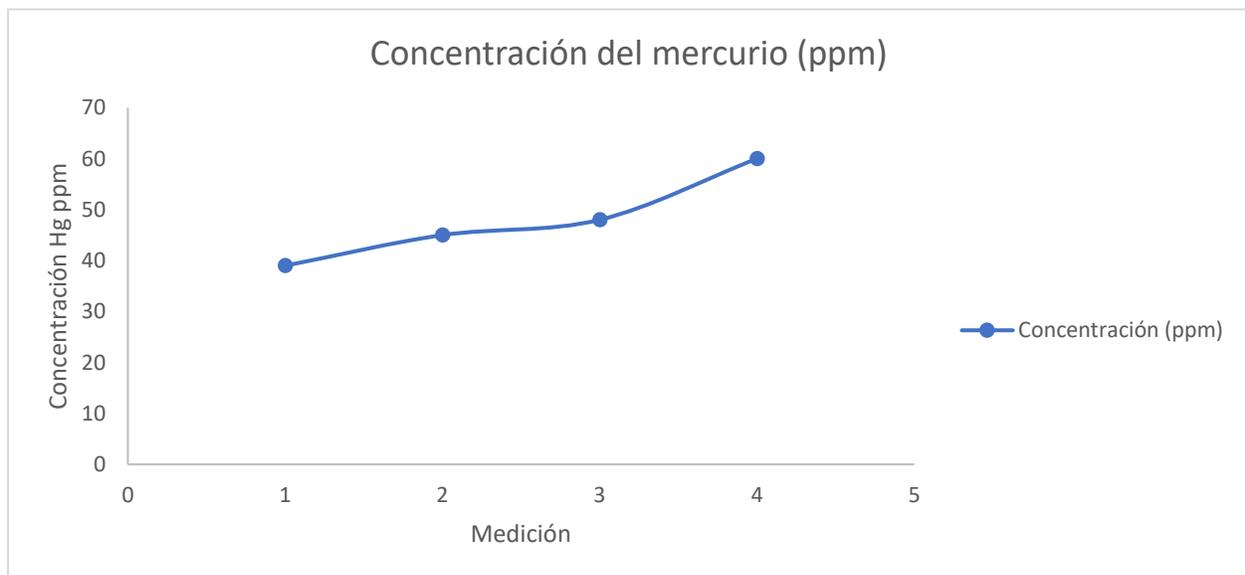
## 7. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con respecto a los resultados obtenidos en el proceso de remoción, se plantea ejecutar el siguiente análisis grafico con un parámetro cronológico, en donde, se toman como variables las mediciones del suelo con respecto a la concentración hallada de mercurio. Esto con el fin, de observar el comportamiento de la yuca en correlación al relave minero.

Inicialmente se expone las mediciones del relave minero sin ninguna intervención de la cáscara de yuca y/o biocarbon el día 5 de enero del 2023.

### Figura 61.

*Concentración de mercurio en el relave minero.*



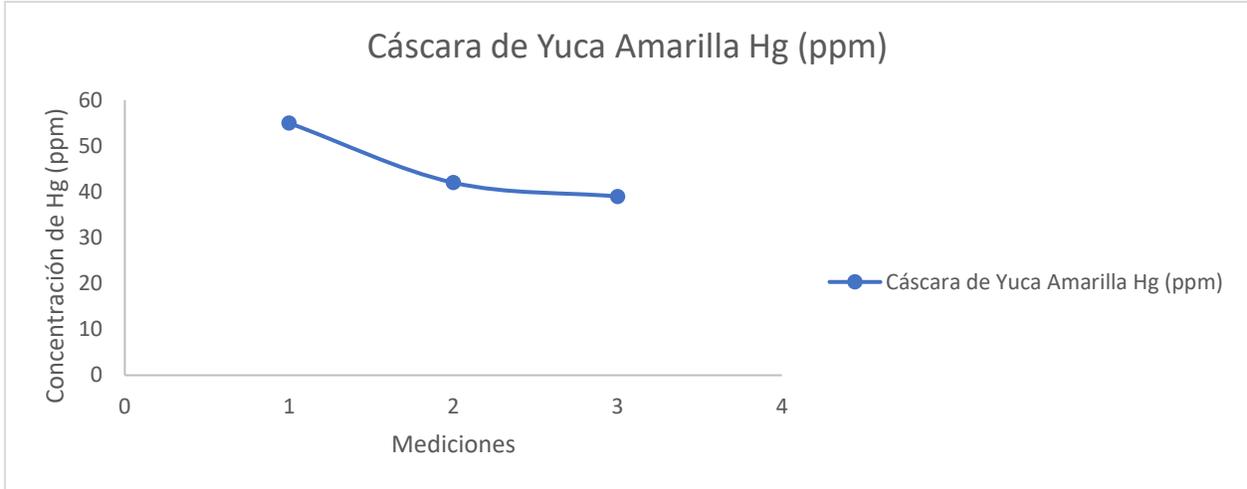
**Nota.** Gráfica 15 - mediciones de concentración de mercurio – muestra del blanco.

Por otra parte se presenta a continuación, el gráfico del relave minero con la presencia de la cáscara de yuca. Las siguientes mediciones fueron tomadas el día 4 de abril del 2023, en donde, se realizó la asignación para cada una de las partes del suelo un tipo de cáscara de yuca. En este caso se asigna 100 g de cáscara de yuca amarilla a una sesión del suelo y 100 g de cáscara de yuca blanca a otra sesión del suelo. Para ello, se ejecutó las respectivas del suelo para cada uno, demostrando los siguientes resultados:

**Cáscara de yuca amarilla:**

**Figura 62.**

*Mediciones de concentración de mercurio.*

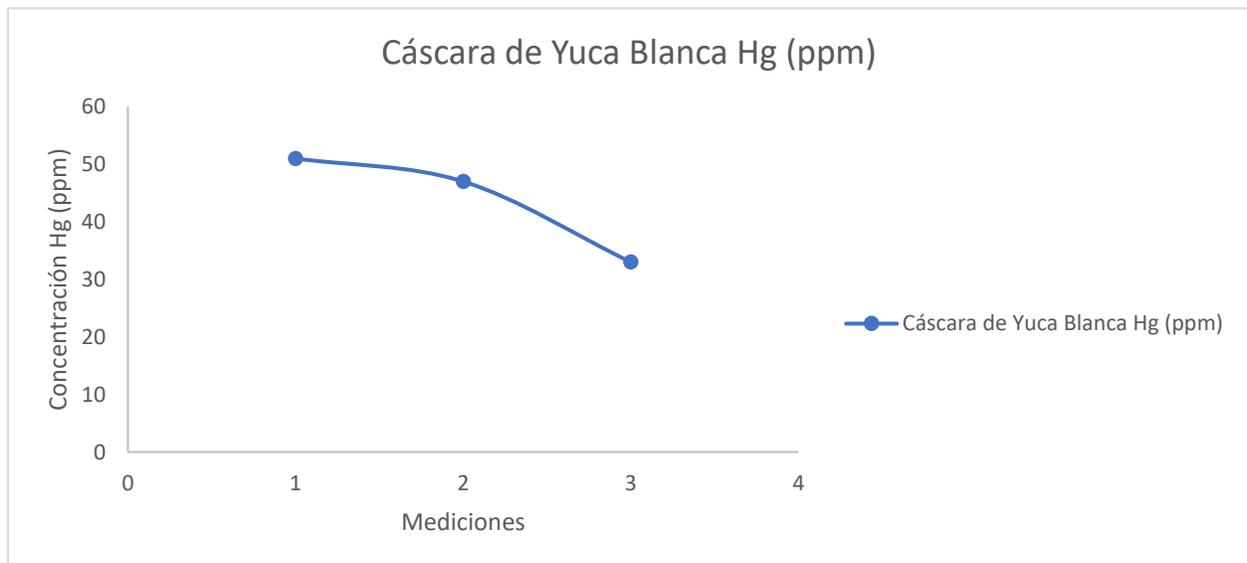


**Nota.** Gráfica16 - medición del mercurio con respecto a la cáscara de yuca amarilla.

**Cáscara de yuca blanca:**

**Figura 63.**

*Mediciones de concentración de mercurio.*



**Nota.** Gráfica 17 - medición del mercurio con respecto a la cáscara de yuca blanca.

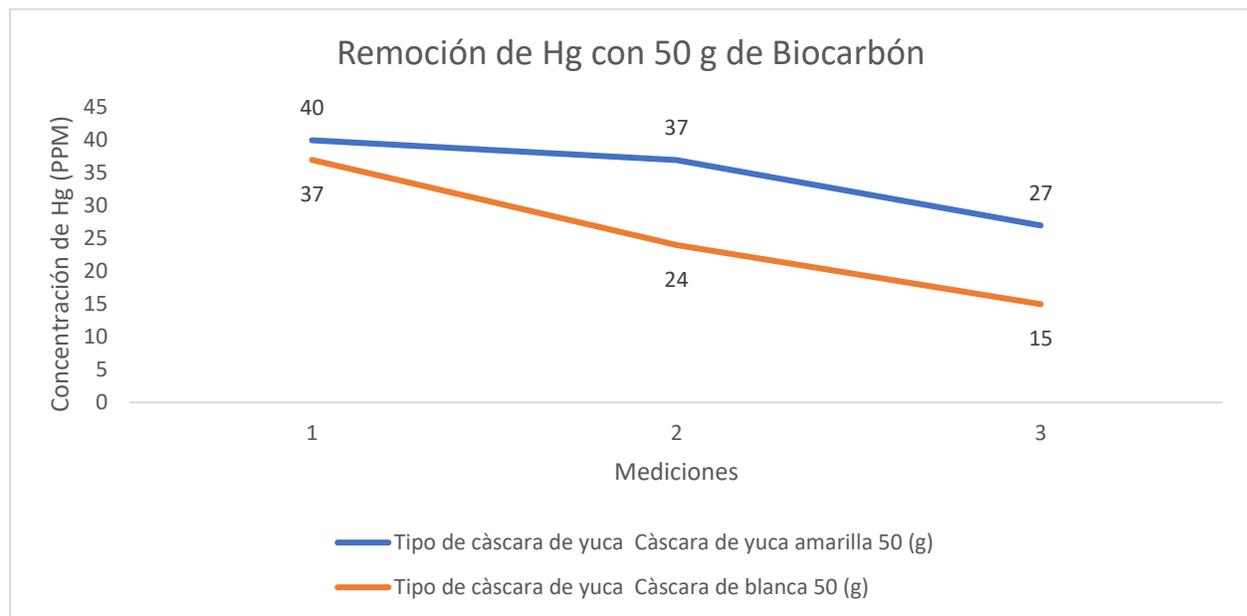
## 7.1 Carbón activado

Para la aceleración de la remoción de los metales pesados en el suelo se añade carbón activado para la ayuda de la adsorción de los componentes con respecto al suelo de muestra. Ya que, con la ayuda de la adsorción que permite por su estructura porosa, de macroporos (menores a 2 nm), microporos (entre 2 y 50 nm) y mesoporos (de 200 a 2000 nm) pueden llegar a suspender partículas muy pequeñas en la estructura del biocarbon.

Para ello, se presenta los resultados de las mediciones del 29 de mayo del 2023, con la asignación del biocarbon. Por lo cual, se observan notoriamente los resultados de este, como se muestra a continuación:

**Figura 64.**

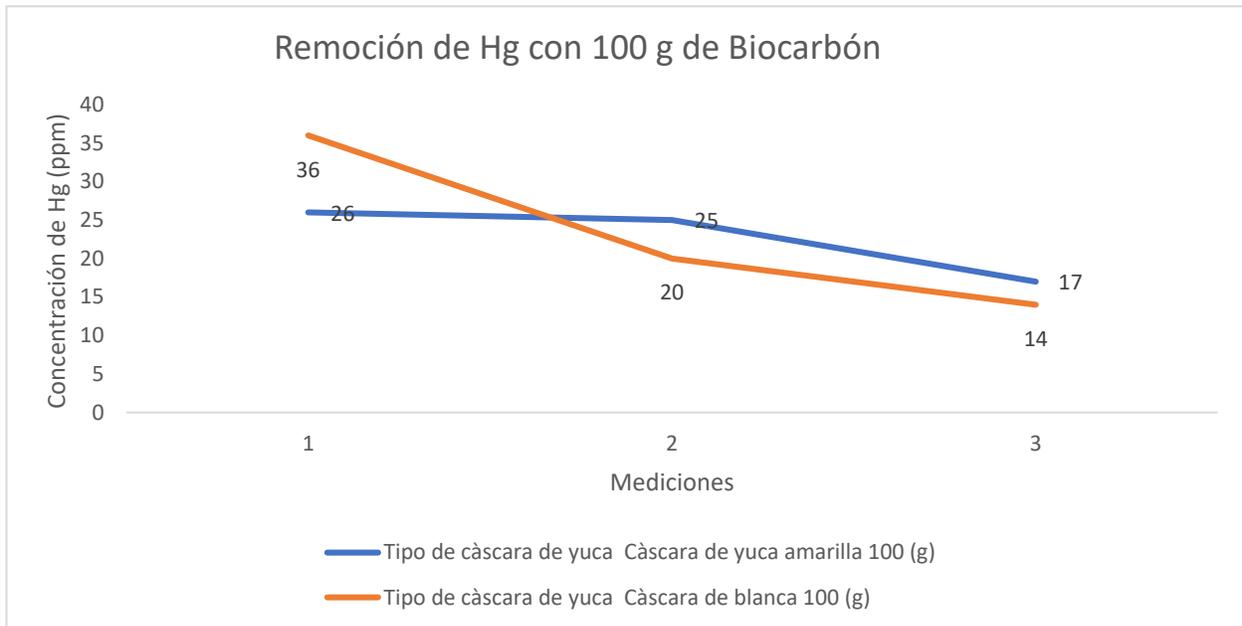
*Remoción de mercurio cáscara de yuca y biocarbon 50 g.*



**Nota.** Gráfica 18 - medición del mercurio con respecto a las cáscaras de yuca con adición de biocarbon con 50g.

**Figura 65.**

*Remoción de mercurio cáscara de yuca y biocarbon 100 g.*



**Nota.** Gráfica 19 - medición del mercurio con respecto a las cáscaras de yuca con adición de biocarbon con 100g.

## 7.2 Matriz de decisión

Con base a la propuesta planteada se realiza la siguiente matriz, en donde, se estipulan dos variables independientes cualitativas, las cuales son, el tipo de cáscara de yuca de un valor de 50 g (amarilla y blanca) y la cantidad de biocarbon añadido al suelo (50 g y 100 g) para el análisis y obtención de la remoción del mercurio en las muestras de suelos a diferentes concentraciones de ppm. Sin embargo, se debe dar salvedad a que para estas últimas mediciones se retiran las cáscaras de yuca para bajar el nivel de concentración de mediciones. Estas muestras son tomadas el 5 de junio del 2023.

Con base a ello, se estipula una hipótesis inicial de remoción del 60% de remoción del mercurio en la muestra de suelo. Seguidamente, se procede a realizar por cada sesión del suelo una medición con el equipo XRF para obtener los valores de concentración de mercurio (ppm) estableciendo tres niveles para cada una de las sesiones de la muestra

del relave minero.

Para el diseño de experimentos se planteó la siguiente hipótesis:

**Ho:** Remoción > 60%

**Ha:** Remoción < 60%

### Variables

#### ***Tipo de cascara de yuca – Variable A (Independiente)***

- Cáscara de yuca amarilla (Dulce)
- Cáscara de yuca blanca (Amarga)

#### ***Cantidad de carbón activado – Variable B (Independiente)***

- Cantidad de 50 g de carbón activado
- Cantidad de 100 g de carbón activado

#### **Tabla 60.**

*Matriz de decisión.*

		Tipo de cáscara de yuca	
		Cáscara de yuca amarilla 50 (g)	Cáscara de yuca blanca 50 (g)
Biocarbon	50 (g)	27	15
		37	24
		40	37
	100 (g)	17	14
		25	20
		26	36

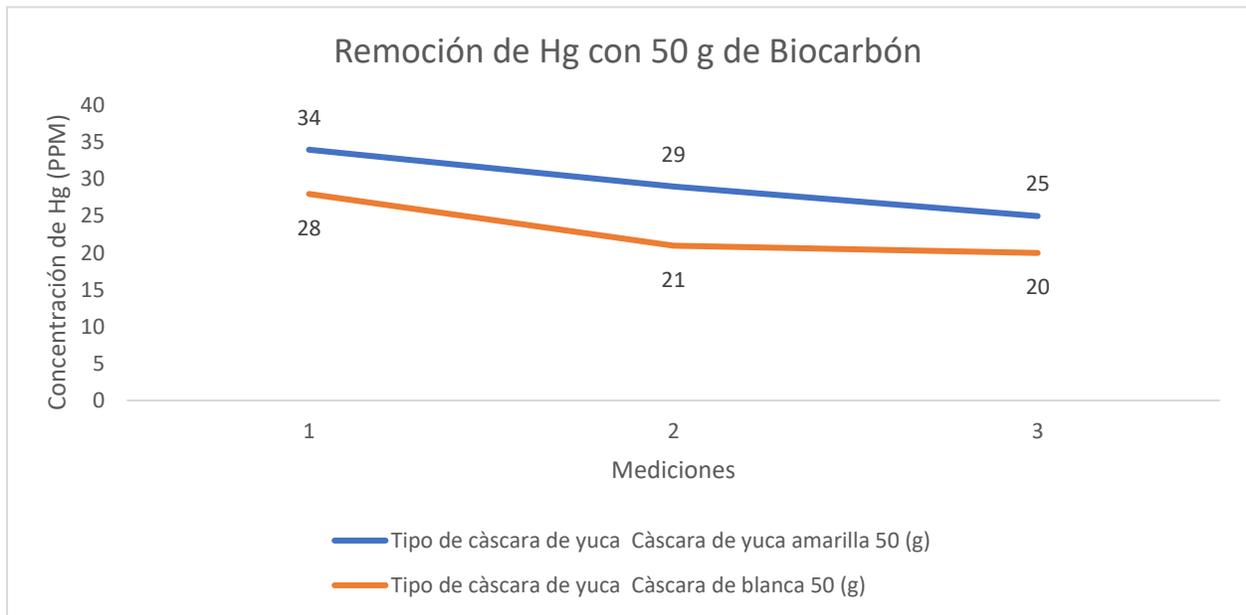
**Nota.** Matriz de decisión de las variables cáscara de yuca con biocarbon.

En la anterior tabla se observa las mediciones de mercurio ppm por cada una de las combinaciones establecidas por el análisis gráfico. En el cual se ejecuta el diseño de

puntos compuestos, para observar la tendencia de remoción del mercurio frente a las variables establecidas. Por lo cual, se procede a realizar un análisis de resultados mediante una gráfica de dispersión del comportamiento de remoción del proyecto, como se muestra a continuación:

**Figura 66.**

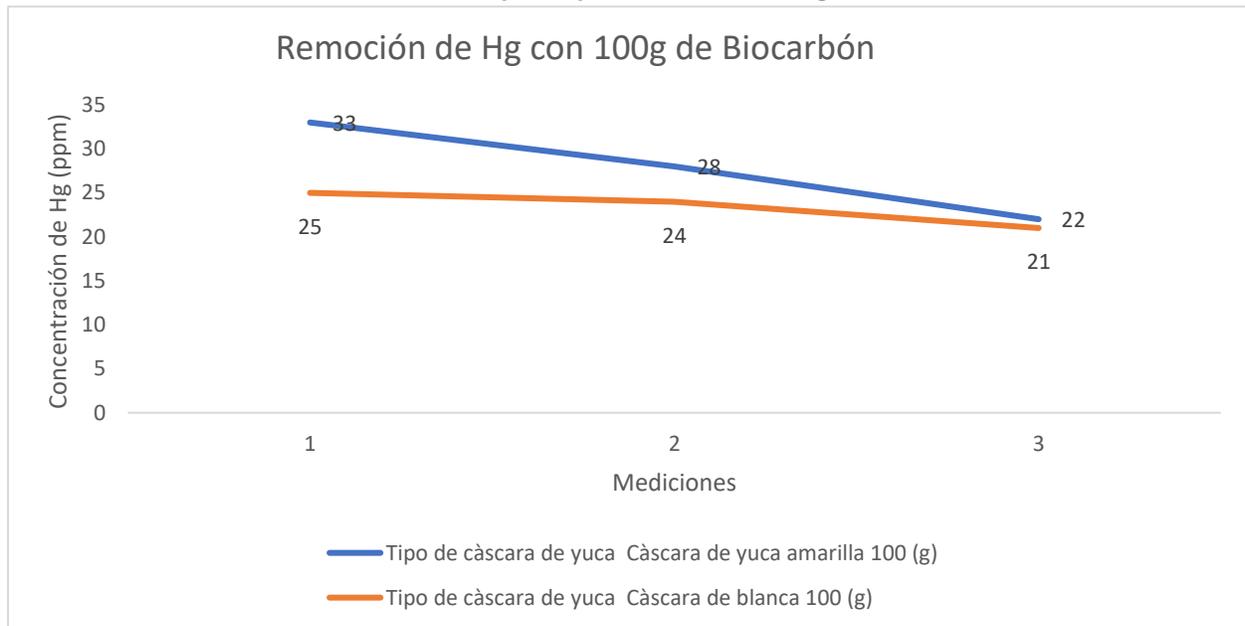
*Remoción de mercurio cáscara de yuca y biocarbon 50 g.*



**Nota.** Gráfica 20 - medición del mercurio con respecto a las cáscaras de yuca con adición de biocarbon con 50 g, cuarta medición.

**Figura 67.**

*Remoción de mercurio cáscara de yuca y biocarbon 100 g.*



**Nota.** Gráfica 21- medición del mercurio con respecto a las cáscaras de yuca con adición de biocarbon con 100 g, cuarta medición.

Con base a las gráficas ilustradas anteriormente, se realiza un análisis con las variables estipuladas con el fin de observar cómo intervienen en la variable de interés, en el cual, en este caso es la concentración de mercurio hallado en la muestra de suelo. Al realizar las correspondientes combinaciones en la parte experimental del tipo de cáscara de yuca con la cantidad añadida con el biocarbon, se demuestra y se comprueba la eficiencia de la cáscara de yuca blanca (amarga) con 100g de biocarbon en correlación a la cáscara de yuca amarilla (dulce) con 100g de biocarbon, la eficiencia de la cáscara de yuca blanca ya que en la obtención de concentración de mercurio se observa valor de 14 ppm de concentración de mercurio hallado en el suelo. A diferencia de la remoción de la cáscara de yuca amarilla con valor final de 17 ppm de mercurio. Por otra parte, se evidencia que entre mayor cantidad de biocarbon añadido al suelo mayor eficiencia de remoción existe en el proceso, por los análisis explicados anteriormente.

## 8. CONCLUSIONES

Con la presente investigación se implementó una remoción de mercurio en relaves mineros proveniente de Yalí, Antioquia mediante cáscara de *Manihot esculenta*, en el proyecto, se usaron los dos tipos de cáscaras que existen, cáscara de yuca amarga (yuca blanca) y cáscara de yuca dulce (yuca amarilla), se realizó de esta manera, para evidenciar, cual cáscara presentaba mayor afinidad con los metales pesados presentes en el suelo. Adicionalmente, al realizar la caracterización del suelo, se detectó una proporción de materia orgánica la cual no estaba promoviendo con la remoción del metal de interés, mercurio, por lo tanto, se adicionó al suelo que se encontraba junto a las cascarras ya mencionadas carbón activado, generando una mayor eficiencia en la remoción de mercurio.

Al adquirir una muestra de suelo proveniente de Yalí, Antioquia, Colombia; se evaluó inicialmente, mediante el equipo XRF, la concentración de metales pesados (ppm) presentes en dicha muestra. Se detectaron principalmente 4 metales que son considerados según la OMS como los que presentan mayor toxicidad que son el cobre, plomo, arsénico y mercurio (tabla 13); teniendo en cuenta la tabla 3, la concentración de los metales en el suelo de Yalí, Antioquia, son anómalas, lo cual indica que la muestra de relave minero, genera contaminación para los seres vivos y su ecosistema, es por esto, que se cumplió con la necesidad de implementar un método de remediación que permitió disminuir la concentración de los metales, en donde el proyecto estuvo enfocado en el mercurio, debido a que es uno de los metales que más daño causa a nivel mundial.

En cuanto a la yuca, esta fue cultivada en la Guajira, Colombia, en el proyecto se implementaron los residuos de la yuca (Cáscara), los cuales pasaron por un proceso de secado, con el fin de disminuir el grado de humedad perteneciente en la cáscara y a si mismo darle uso para la remoción. En el transcurso del proyecto se fue evidenciando, mediante las mediciones realizadas la adsorción de metales gracias a la cáscara de yuca, los dos tipos de cáscara lograron remover mercurio, sin embargo, el que logró adsorber mayor concentración del metal fue la cáscara de yuca amarga (yuca blanca),

esto se debe a la mayor concentración de glúcidos cianogénicos presentes en la cáscara de yuca amarga.

Con ayuda del equipo XRF, se evidencio durante el proceso la remoción del mercurio presente en la muestra de suelo. Esto se debe a los parámetros anteriormente evaluados tales como; la cáscara de yuca, el carbón activado y la presencia de materia orgánica, en donde se determinó la afinidad de remoción entre la cáscara de yuca y el mercurio, generando así una disminución de a próximamente 20 ppm entre la primera y la última medición realizada, demostrando de esta manera que el esquema propuesto en el proyecto cumplió con el objetivo de remediar la muestra de relave minero.

Con base al resultado del diseño de experimentos se concluye la aprobación estadística de que las dos variables a trabajar, es decir, el tipo de yuca y el carbón activado, cumple con la remoción del mercurio en la muestra de suelo. Sin embargo, se demuestra la eficiencia de remoción en de la variable de tipo de cáscara de yuca blanca (amarga) con 100 g carbón activado con mayor grado de remoción de mercurio con un valor de 23,3 ppm de mercurio, en comparación del valor de la cáscara de yuca amarilla. Por tanto, con lo mencionado anteriormente se comprueba que la hipótesis inicial se respalda con los resultados estadísticos obtenidos por el ANOVA del diseño de experimentos, en donde, se indicó que la hipótesis inicial de la propuesta de remoción era remover más del 60% del mercurio en la muestra del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Selvi., A. Rajasekar, y J. Theerthagiri, "Integrated Remediation Processes Toward Heavy Metal Removal/Recovery from Various Environments-A Review", *Sec. Environmental Toxicology*, vol. 7, pp. 15, mayo, 2019, [En línea].  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2019.00066/full>
- [2] M.S. Abdullahi, "Soil Contamination, Remediation and Plants", *Rhizofiltration*, pp. 525-546, 2015, [En línea].  
<https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/rhizofiltration>
- [3] S.Mandal, A. K. Passari, "Recent Advancement in Microbial Biotechnology", *Agricultural and Industrial Approach*, pp. 357-385, 2021, [En línea].  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128220986000148>
- [4] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, "Metales pesados", [En línea]  
[https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales\\_pesados.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx)
- [5] Lifeder, jul, 2022, "Biorremediación: qué es, tipos, ventajas y desventajas", [En línea].  
Disponible: <https://www.lifeder.com/biorremediacion/>
- [6] Departamento nacional de planeación, dic, 2021, "Glosario", *Emisiones antropogénicas*, [En línea]  
Disponible: <https://mrv.dnp.gov.co/MRV/Paginas/Glosario.aspx>
- [7] Progresos de la investigación sobre la biorremediación de la contaminación por mercurio - *Departamento de Recursos Naturales de la provincia de Hebei*, [En línea]  
<http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v19n2/0124-7107-reus-19-02-00309.pdf>

- [8] J.V.Vidal, J.L.Marrugo, B. Jaramillo, y L.M. Perez “Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*)”, *Remoción del mercurio*, no 27, jun, 2010. [En línea].
- [9] Ovacen, “Energía biomasa: Qué es, cómo se obtiene y ventajas”, [En línea].  
Disponible: <https://ovacen.com/energias-renovables/biomasa/#:~:text=La%20biomasa%20es%20la%20energ%C3%ADa%20renovable%20que%20aprovecha%20todo%20lo,solar%20almacenada%20en%20recursos%20naturales>.
- [10] Lenntech. “Mercurio (Hg) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente.”, [En línea].  
Disponible: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>
- [11] Definición ABC, “Definición de Remoción.”, [En línea.]  
Disponible: <https://www.definicionabc.com/general/remocion.php>
- [12] NaturalistaCO, “Yuca (*Manihot esculenta*).”, [En línea].  
Disponible: <https://colombia.inaturalist.org/taxa/165138-Manihot-esculenta>
- [13] Ecología verde, feb, 2021, “Rizosfera: qué es, para qué sirve, composición e importancia.”, [En línea].  
Disponible: <https://www.ecologiaverde.com/rizosfera-que-es-para-que-sirve-composicion-e-importancia-3266.html>
- [14] Green Facts, “Mercurio: 3. ¿Qué efectos tiene el mercurio sobre el medio ambiente?”, [En línea].  
Disponible: <https://www.greenfacts.org/es/mercurio/l-2/mercury-3.htm>
- [15] Noticias Caracol, abril, 2022, “Minería ilegal, un cáncer que carcome el medio ambiente en Colombia” [Vídeo].

Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=PcYAOvWu1gw>

[16] Organización mundial de la salud, marzo, 2017, “El mercurio y la salud”, [En línea.]

Disponible: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>

[17] S.E.Pabón, R. Benítez, R.A. Sarria, y J.A. Gallo, “Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción”, vol 14, no. 27, 4 pp, jun, 2022, [En línea].

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672020000100009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009)

[18] Corte constitucional, “*Sentencia T-051/11.*”, [En línea].

Disponible: <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/t-622-16.htm>

[19] Gov.com, abril, 2021, “Colombia prohíbe fabricación, importación y exportación de productos con mercurio añadido”, [En línea].

Disponible: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/colombia-prohibe-fabricacion-importacion-y-exportacion-de-productos-con-mercurio-anadido/#:~:text=Bogot%C3%A1%20D.%20C.%2C%2023%20de%20abril,en%20la%20protecci%C3%B3n%20del%20medioambiente.>

[20] G.Peña, “La megaminería en el páramo de Santurbán”, *Alternativas económicas para las comunidades del páramo de Santurbán*, no.1, 20 pp, abril, 2020, [En línea].

<https://www.indepaz.org.co/wp-content/uploads/2020/04/Revista-Encuentros.-Abril-del-2020.pdf>

[21] ICMM, ago, 2022, “Acerca de los relaves”, [En línea].

Disponible: <https://www.icmm.com/es/gestion-ambiental/gestion-de-desechos/acerca-de-los-relaves>

[22] Protección laboral, jun, 2017, “Minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), infra-mundo laboral.”, [En línea].

Disponible: [https://www.interempresas.net/Proteccion-laboral/Articulos/212825-Mineria-artesanal-y-de-pequena-escala-\(MAPE\)-infra-mundo-laboral.html](https://www.interempresas.net/Proteccion-laboral/Articulos/212825-Mineria-artesanal-y-de-pequena-escala-(MAPE)-infra-mundo-laboral.html)

[23] Sistema de información minero colombiano, nov, 2022, “Oro”, [En línea].

Disponible: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.asp,x>  
[Acceso: 14-ene-2023]

[24] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2022, “Problemática ambiental de contaminantes”, [En línea].

Disponible: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/> [Acceso: 11-nov-2022]

[25] Lenntech, “Propiedades químicas del Titanio - Efectos del Titanio sobre la salud - Efectos ambientales del Titanio”, [En línea].

Disponible: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ti.htm>

[26] Manual Merck, jun, 2022, “Envenenamiento con hierro”, [En línea].

Disponible: <https://www.merckmanuals.com/es-us/professional/lesiones-y-envenenamientos/intoxicaci%C3%B3n/envenenamiento-%20con-hierro>, [Acceso: 06-feb-2023]

[27] Organización mundial de la salud, dic, 2022, “Arsénico”, [En línea].

Disponible: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

[28] Lenntech, “Rubidio (Rb) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente.”, [En línea].

Disponible: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/rb.htm>

- [29] Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, mayo, 2016, “ToxFAQsTM: Estroncio (Strontium)”, [En línea].  
Disponible: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts159.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts159.html)
- [30] Lenntech, “Circonio (Zr) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente”, [En línea].  
Disponible: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/zr.htm>
- [31] Lenntech, “Mercurio (Hg) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente.”, [En línea].  
Disponible: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>
- [32] Organización mundial de la salud, ago, 2022, “Intoxicación por plomo y salud”, [En línea].  
Disponible: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- [33] Green Facts, “¿Qué es el mercurio?”, [En línea].  
Disponible: <https://www.greenfacts.org/es/mercurio/n-3/mercurio-1.htm>
- [34] Lenntech “Mercurio (Hg) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente.”, [En línea].  
Disponible: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>
- [35] Características generales del mercurio y su impacto ambiental “Propiedades físico-químicas”. [En línea].  
<https://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-2-1.htm>
- [36] Instituto Gemológico Español, “Reducción del uso de mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala.”, *El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala*, Módulo 3, 20 pp, [En línea].

[https://ige.org/archivos/IGE/mercurio\\_en\\_la\\_Mineria\\_de\\_Au.pdf](https://ige.org/archivos/IGE/mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf) [Acceso 14-ene-2023]

[37] S.E.Cano, “Contaminación con mercurio por la actividad minera”, *biomédica*, vol. 32, no.3, 3 pp, oct, 2012, [En línea].

Disponible: <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/1437>

[38] Organización mundial de la salud, mar, 2017, “El mercurio y la salud.” [En línea].

Disponible: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>

[39] Lenntech, “Plomo (Pb) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente.” [En línea].

Disponible: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm>

[40] Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades, (s.f), “Resumen de Salud Pública: Plomo (Lead)”. [En línea]

Disponible: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs13.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html)

[41] Enciclopedia Humanidades, “Plomo: qué es, propiedades, usos, riesgos y características”, [En línea]

Disponible: <https://humanidades.com/plomo/> [Acceso: 24-ene-2023]

[42] Concepto, (s.f), “Plomo”, [En línea].

Disponible: <https://concepto.de/plomo/>

[43] UABDivulga, nov, 2018, “El plomo: un problema medioambiental y para la salud.”, [En línea].

Disponible: <https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/el-plomo-un-problema-medioambiental-y-para-la-salud-1345680342040.html?noticiaid=1345777559254>

[44] Organización mundial de la salud, ago, 2022, “Intoxicación por plomo y salud”,

[En línea].

Disponible: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

[45] Ayuntamiento de Huelva, "Contaminación por metales pesados", [En línea].

Disponible: <http://www.lineaverdehuelva.com/lv/consejos-ambientales/contaminantes/Contaminacion-por-metales-pesados.asp>

[46] J.Ubillus, "Estudio sobre la presencia del plomo en el medio ambiente de Talara en el año 2023", *Fuentes de contaminación de plomo*, cap 3, 38 pp, (s.f), [En línea]

[https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/ubillus\\_lj/cap3.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/ingenie/ubillus_lj/cap3.pdf)

[47] Olympus, abril, 2015, "Analizadores XRF portátiles", [En línea].

Disponible: <https://www.olympus-ims.com/es/xrf-analyzers/handheld/>

[48] L.J. Salamanca, "Minería en Colombia.", *Fundamentos para superar el modelo extractivista*, 212 pp, mayo, 2013, [En línea].

<https://s3.amazonaws.com/rgi-documents/dd602e649bbe8a763c84fdf50a47dfa0c731072e.pdf>

[49] A.González, "Manual de producción y consumo sostenible Gestión de recursos hídricos", *Minería de oro*, 73 pp, 2016, [En línea].

[https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/Mineria\\_Oro.pdf](https://www.corantioquia.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/Mineria_Oro.pdf)

[50] Ministerio de minas y energía-ATG LTDA, " Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería ", *Contrato de consultoría cgc-468-2022*, 143 pp, dic, 2020, [En línea]

[51] Ministerio de minas y energía-ATG LTDA, " Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería ", *Contrato de consultoría cgc-468-2022*, 143 pp, dic, 2020, [En línea]

[52] Ministerio de minas y energía-ATG LTDA, " Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería ", *Generación, tratamiento y disposición de los relaves (colas)*, 143pp, dic, 2022, [En línea]

[53] Ministerio de minas y energía-ATG LTDA, " Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería ", *Generación, tratamiento y disposición de los relaves (colas)*, 143pp, dic, 2022, [En línea]

[54] L.J. Salamanca, "Minería en Colombia.", *Fundamentos para superar el modelo extractivista*, 212 pp, mayo, 2013, [En línea].  
<https://s3.amazonaws.com/rgi-documents/dd602e649bbe8a763c84fdf50a47dfa0c731072e.pdf>

[55] I.Angurell, (s.f), "Operaciones básicas en el laboratorio de química", *Precipitación, Fundamentos de la técnica*, [En línea]  
Disponible: [https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio\\_fonament.html#](https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/precipitacio_fonament.html#)

[56] Condorchem, abril, 2013, " Tipos de membranas de filtración y posibles configuraciones.", [En línea].  
Disponible: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-tipos-de-membranas-de-filtracion-y-posibles-configuraciones/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20una%20membrana%20de,de%20ella%20de%20forma%20selectiva.>

[57] Condorchem, (s.f), "Electrodialisis (ED) y electrodiálisis reversible (EDR)", [En línea].  
Disponible: <https://condorchem.com/es/electrodesionizacion/>

[58] Programa naciones unidas, (s.f), "Convenio de Minamata sobre el mercurio",

[En línea]

Disponible: <https://mercuryconvention.org/>

[59] Gov.co, "Convenio de Minamata sobre el mercurio", [En línea]

Disponible: <https://www.cancilleria.gov.co/convenio-minamata-sobre-mercurio>

[60] Municipios de Colombia, "El municipio de Yalí", [En línea].

Disponible: <https://www.municipio.com.co/municipio-yali.html><sup>61</sup> El clima en Yalí, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia) - Weather Spark. (s. f.). <https://es.weatherspark.com/y/23407/Clima-promedio-en-Yal%C3%AD-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

[61] Weaaher Spark, " El clima en Yalí, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia).", [En línea].

Disponible: <https://es.weatherspark.com/y/23407/Clima-promedio-en-Yal%C3%AD-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

[62] J.M Becerril, O.Barrutia, J.G. Plazaola, A. Hernández, J.M.Olano, "Especies nativas de suelos contaminados por metales", *Aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación*", 2007, [En línea]

[63] Fertilab, " Los metales pesados en el suelo.", [En línea].

Disponible: <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/Los-metales-pesados-en-el-suelo.pdf>

[64] "EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD PARA LA DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS QUALITY PARAMETERS EVALUATION FOR ORGANIC CARBON DETERMINING IN SOILS", [En línea].

Disponible: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-28042005000200009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042005000200009)

[65] J.García Galvis, M.I. Ballesteros González, "Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos", vol.34, no.2, dic, 2005, [En

línea].

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-28042005000200009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042005000200009)

[66] J.H.Cock, J H " New potential for a neglected crop. Westview Press, Boulder, CO.", 1989. [En línea]

[67] J.Aristizábal, T.Sánchez, y L.Mejía, "Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO 163. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación", 1-137 pp, 2007. [En línea]

[68] H.Ceballos, y A.De la Cruz, "Taxonomía y morfología de la yuca. En: Ceballos, H. y Ospina, B. La yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización." CIAT. Cali, Colombia, 26 – 586 pp, 2002. [En línea]

[69] Miguel Calvo, " GLUCOSIDOS CIANOGENICOS", *Bioquímica de los alimentos*. [En línea].

Disponible: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/toxico/glucosidoscn.html>

[70] T.Sánchez, "Evaluación de 6000 variedades de yuca. Cali, Colombia", *Programa Mejoramiento de Yuca-CIAT*, 2004, [En línea].

[71] G.H Debruijn, "The cyanogenic carácter of cassava. In: B. Nestel and R. MacIntyre (eds). Chronic cassava toxicity. International Development Research Center, Ottawa Canadá", 43 – 48 pp, 1973, [En línea].

[72] G. Gómez, G, "Cassava, cyanide and animal nutrition. In: Workshop on Cassava Toxicity and Thyroid: Research and Public Health Issues" Ottawa, International Development Research Center, mayo, 1982, [En línea].

[73] Quimica.es, "Amilosa." [En línea].

Disponible: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Amilosa.html>,

[74] Arvensis, jun, 2019, "Coloide, suspensión, gel y flow", [En línea].

Disponible: <https://www.arvensis.com/es/blog-aclaracion-de-conceptos-coloide-suspension-flow-y-gel/>

[75] Quimica.es, "Amilopectina", [En línea]

Disponible: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Amilopectina.html>

[76] A.Díaz,y , M.Modesta,(2012). "La yuca en el Caribe colombiano:" De cultivo ancestral a agroindustrial", no.152, 64 pp, ene, 2012. [En línea].

[https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser\\_158.pdf](https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser_158.pdf)

[77] Ministerio de agricultura y desarrollo rural, " Subsector productivo de la yuca", [En línea].

<https://sioc.minagricultura.gov.co/Yuca/Documentos/2019-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

[78] M.A.Díaz, "La yuca en el Caribe colombiano: Del cultivo ancestral a agroindustrial.", *Documentos de trabajo sobre economía regional*, 64 pp, ene, 2012, [En línea].

[https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser\\_158.pdf](https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/dtser_158.pdf)

[79] L.F.Cadavid, "Producción de yuca. Manual." *CLAYUCA*.36 pp, 2005, [En línea].

[80] B.Ospina, M.García, "Sistemas mecanizados de siembra y cosecha para el cultivo de la yuca.", *La yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*, 326-339 pp, 2002, [En línea].

[81] R.D.Cooke, y E.N.Maduagwu, "The effects of simple processing on the cyanide content of cassava chips. J.", *Food Technol.*, vol.13, 299-306 pp, 1978, [En línea].

- [82] F.Calle, "Control de malezas en el cultivo de la yuca", *La yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*, pp. 126-128, 586 pp, 2002, [En línea].
- [83] Clayuca, "Informe anual de actividades junio 1999 – julio 2000", 2015, [En línea].
- [84] D.Ortiz Gómez, "El agua en la agricultura", vol.1, no.1, 2 pp, jun, 2006, [En línea].  
<https://doi.org/10.17163/lgr.n1.2002.13>
- [85] Sinergia, "Producción respetuosa en Viticultura", *Impactos ambientales*, 11 pp. (s.f), [En línea].  
<https://docplayer.es/10379728-Produccion-respetuosa-en-viticultura-impactos-ambientales-en-agricultura.html>
- [86] F.F.Pino, "Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción.", *sistema de adsorción*, 2 pp, jul, 2011, [En línea].  
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4986/fichero/indice.pdf>
- [87] I.García, y C.Dorronso, "Contaminación de suelo", *Contaminación por metales pesados*, [En línea].  
<http://www.edafologia.net/conta/tema00/progr.htm>
- [88] E.A.Ávila, A.E.Darghan, "Influencia de la mineralogía de arcillas, textura y contenido de carbono orgánico sobre el índice de friabilidad de suelos cultivados con caña de azúcar.", vol.40, no.2, 19-31 pp, jun, 2016. [En línea].  
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/27354>
- [89] A.Faz, J.Moreno y R.M.Rosales, "Intensificación ciencias de la tierra", *Análisis de residuos. Metales pesados biodisponibles*, (s.f), [En línea].  
[http://ftp.murciaeduca.es/programas\\_educativos/Nuevo1/LIBROETSIA/intensificacin](http://ftp.murciaeduca.es/programas_educativos/Nuevo1/LIBROETSIA/intensificacin)

\_ciencias\_de\_la\_tierra.html

[90] L.Rojas, J.L.Prin, J.Noriega, L.A.Albornoz, B.Hidalgo, y A.Ramírez, "Determinación de mercurio en suelos del sector minero las claritas, estado Bolívar, mediante procesos analíticos de especiación y microscopia electrónica de barrido (MEB)." vol.20, no.3, 2008, [En línea].

<https://www.redalyc.org/pdf/4277/427739435011.pdf>

[91] G.E.Román, "Estudio computacional de la estructura y reactividad de materiales porosos y su interacción con moléculas de interés farmacéutico.", 181, 2021. [En línea].

[https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/5724/ROM%C3%81N%20G.E.\\_TESIS..pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/5724/ROM%C3%81N%20G.E._TESIS..pdf?sequence=2&isAllowed=y)

## GLOSARIO

**BIORREMEDIACIÓN:** es todo proceso biotecnológico que emplea las capacidades metabólicas de microorganismos bacterianos, hongos, plantas y/o sus enzimas aisladas, para eliminar contaminantes en suelos y aguas, y volverlos a su condición natural. [5]

**EMISIONES ANTROPOGÉNICAS:** son emisiones de gases de efecto invernadero, asociados con actividades humanas. Entre estas actividades se incluyen la combustión de combustibles fósiles para producción de energía, la deforestación y los cambios en el uso de las tierras que tienen como resultado un incremento neto de emisiones. [6]

**ENERGÍA BIOMASA:** es la materia orgánica vegetal o animal que puede utilizarse para fines energéticos. Incluye materiales como árboles y otras plantas, desechos de animales, hasta cultivos alimentarios y residuos agrícolas, pasando por aguas residuales y estiércol. [9]

**FIJACIÓN DE INCRUSTACIONES:** los microorganismos se incrustan en el vector curado, tienen las ventajas de una fuerte estabilidad, evitación de la pérdida de cuerpo bacteriano y alta eficiencia de las especies bacterianas, como la mayor concentración de Hg que puede ser desintoxicada por cepas inmovilizadas fijadoras de nitrógeno en comparación con sus células libres. [7]

**FITORREMEDIACIÓN:** la fitorremediación es un enfoque ecológico que podría ser una medida de mitigación exitosa para revegetar el suelo contaminado con metales pesados de una manera rentable. Hoy en día se trata de elaborar un estudio, el cual, se centre en las estrategias aplicadas para mejorar la eficiencia de la Fito estabilización y la Fito extracción, incluida la aplicación de la ingeniería genética, los enfoques asistidos por microbios y los quelatos. [3]

**MANIHOT ESCULENTA:** la yuca es un arbusto perenne que alcanza los dos metros de altura. Está adaptada a condiciones de la zona intertropical, por lo que no resiste las

heladas. Requiere altos niveles de humedad, aunque no anegamiento y de sol para crecer. [12]

**MERCURIO:** elemento químico, símbolo Hg, número atómico 80 y peso atómico 200.59. es un líquido blanco plateado a temperatura ambiente (punto de fusión  $-38.4^{\circ}\text{C}$  o  $-37.46^{\circ}\text{F}$ ); ebulle a  $357^{\circ}\text{C}$  ( $675.05^{\circ}\text{F}$ ) a presión atmosférica. Es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. [10]

**METALES PESADOS:** los metales pesados se definen como elementos metálicos que tienen una densidad relativamente alta en comparación con el agua. Con la suposición de que la pesadez y la toxicidad está interrelacionada, los metales pesados también incluyen metaloides, como el arsénico, que pueden inducir toxicidad a bajo nivel de exposición. [4]

**REMEDIACIÓN:** es un proceso químico-biológico el cual, se considera una alternativa altamente económica y ecológica para tratar metales pesados que contienen aguas residuales. Se ha informado que la implementación de este tratamiento integrado que el tratamiento químico o biológico individual es viable y así mismo ha mostrado resultados significativos de eliminación de metales pesados por muchos investigadores en todo el mundo. [1]

**REMEDIACIÓN DE MERCURIO:** es un método por el cual se utiliza mediante agentes biológicos y/o microorganismos. Mas, sin embargo, se debe de tener en cuenta que, la eficacia de la remediación está limitada por la biodisponibilidad del metal y la profundidad de la zona de la raíz, así como por la cantidad de cosecha requerida, el manejo de la biomasa recolectada que contiene mercurio puede ser problemático y puede aumentar los costos del proceso, además, es necesario controlar el sitio durante un período muy largo. [8]

**REMOCIÓN:** el término remoción se utiliza para hacer referencia a todo aquel acto que tenga ver con quitar algo de su lugar. La remoción puede llevarse a cabo respecto de

objetos o de elementos, así como también de personas de un cargo o de un puesto en el que se encuentran normalmente. [11]

**RIZOFILTRACIÓN:** la rizofiltración es la adsorción en las raíces de las plantas o la absorción en las raíces de las plantas de contaminantes que están en solución alrededor de la zona de la raíz (rizosfera). La rizo filtración se utiliza para descontaminar las aguas subterráneas. En donde, se quiere dar una revisión crítica del papel potencial de los microbios, las plantas y su interacción junto con los enfoques biotecnológicos que utilizan genes microbianos para mejorar el potencial de fitorremediación. [2]

**RIZOSFERA:** la rizosfera, considerada como el ecosistema terrestre más grande, es la parte del suelo próxima a las raíces de la planta, que se extiende concretamente entre 1 y 3 mm desde la superficie de las raíces al interior del suelo. [13]

## ANEXO 1

### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO XRF



#### CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

CC-XRF-002

1. Información general:

Número de certificado:	CC-XRF-002
Datos del Cliente:	Pure Earth KM. 2 VÍA CHÍA - CAJICÁ HACIENDA FONTANAR CIPRES 73
Orden de servicio:	OS-020-07-01
Fecha de calibración :	9/07/2020
Modelo del equipo:	DCC-6000 Olympus
Número de serie del equipo:	570383
Identificación interna del equipo:	TE-688

2. Procedimiento de calibración:

La calibración se realizó según el procedimiento sugerido por el fabricante Olympus Scientific Solutions Americas, utilizando material certificado de referencia con su composición química conocida y trazable a estándares internacionales. Este procedimiento de prueba cumple con los requisitos especificados en la norma técnica colombiana NTC-ISO/IEC 17025:2017.

3. Revisión de hardware del equipo:

Verificación de hardware				
Criterios	Pasó	No pasó	N/A	Observaciones
Sistema de carga		X		Docking station no permite la carga de la batería instalada en el equipo
Funciones de seguridad radiológica	X			
Tubo de rayos X	X			
Rueda de filtros	X			
Display	X			
Función Cal Check	X			

**Nota:** La verificación del hardware se realizó según el procedimiento sugerido por el fabricante Olympus de acuerdo a la sección 2 del manual de usuario "DELTA Family Handheld XRF Analyzer" y con el uso de la herramienta de software Delta Tools.

Página 1 de 3

Calle 31 No. 13 A -51 TORRE 1 OF. 210. Bogotá D.C. Colombia  
Tel: 57-1-3593997 / 3593998 Servicio Soporte Técnico Ext 104-121  
E-mail: info@tecsud.com  
www.tecsud.com

4. Datos de calibración:

CC-XRF-002

Datos de Calibración						
ESTÁNDAR	DESCRIPCIÓN DEL ESTÁNDAR	ELEMENTO	MIN [%]	MAX [%]	LECTURA [%]	ESTÁ DENTRO DE TOLERANCIA?
2711a	NIST Standard Reference Material 2711a Montana II Soil	K	2,38	2,66	2,63	SI
		Ca	2,30	2,64	2,59	SI
		Ti	0,30	0,40	0,32	SI
		Pb	0,13	0,15	0,13	SI
		Mn	400,00	700,00	428 PPM	SI
		Zn	300,00	500,00	356 PPM	SI
		Sr	210,00	250,00	234 PPM	SI
		Cu	130,00	150,00	131 PPM	SI
		As	10,00	100,00	68 PPM	SI
		Cd	40,00	60,00	42 PPM	SI
		Ni	10,00	50,00	42 PPM	SI
		Sb	10,00	50,00	37 PPM	SI
Blank	Silica XRF Standard SiO <sub>2</sub>	Si	51,30	56,70	Not detected	SI

**Los certificados de estos materiales de referencia están disponibles por solicitud del cliente**

**Nota 1:** El procedimiento fue realizado utilizando el modo "Soil" configurado en el equipo con un tiempo de análisis de 180 segundos.

**Nota 2:** Los resultados contenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. La precisión de las mediciones dependen del buen estado de la ventana del equipo y una buena preparación de la muestra a analizar. El usuario asume la responsabilidad de verificar periódicamente el correcto funcionamiento del equipo de acuerdo al procedimiento sugerido en el manual del usuario.

**5. Información adicional de la prueba:**

Fecha de recepción del equipo:	8/07/2020		
Identificación interna del equipo:	TE-688		
Lugar:	Laboratorio de calibración Tecsud SAS		
Hora inicial:	9:00:00 a. m.	Hora final:	5:00:00 p. m.
<b>CRITERIOS</b>	<b>Mínima</b>	<b>Máxima</b>	
Temperatura [°C]	19,4	19,6	
Humedad relativa	54%	52%	

**6. Equipos y elementos de referencia utilizados :**

Kit estándares de calibración	Número de control 159197
Termohigrómetro	Serial 10017787

Fecha de elaboración de informe: 9/07/2020

**Firmas autorizadas:**

Elaborado por:

*Javier Daza N.*

JAVIER DAZA

Ingeniero de Soporte Técnico

Revisado y Autorizado por:

*Cristian Castañeda*

CRISTIAN CASTAÑEDA

Ingeniero de Soporte Técnico

Nota: Tecsud SAS no ofrece ningún tipo de garantía, expresa o implícita, en cuanto a los resultados que se obtendrán por alguna persona o entidad a partir del uso de este documento. Tecsud S.A.S. no ofrece ningún tipo de garantía relacionado a la falla de alguno de los componentes del equipo. Este informe solo podrá reproducirse en su totalidad y con la correspondiente autorización de Tecsud S.A.S.

Fin de resultado

