

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que Jaileth Jiménez García y Diana Margarita Palacio Carreño autorizan a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea de la Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan finalidad académica, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Bibliotecas Bucaramanga
Universidad Santo Tomás**

**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES PESADOS (Cu, Cr, Hg, Pb
y Zn) EN SEDIMENTOS GENERADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA EN LOS
DISTRITOS DE VETAS Y CALIFORNIA (SANTANDER)**

**JAILETH JIMÉNEZ GARCÍA
DIANA MARGARITA PALACIO CARREÑO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISION DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE QUÍMICA AMBIENTAL
FLORIDABLANCA
2016**

**DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE METALES PESADOS (Cu, Cr, Hg, Pb
y Zn) EN SEDIMENTOS GENERADOS POR LA ACTIVIDAD MINERA EN LOS
DISTRITOS DE VETAS Y CALIFORNIA (SANTANDER)**

**JAILETH JIMÉNEZ GARCÍA
DIANA MARGARITA PALACIO CARREÑO**

Trabajo de grado para optar el título de Químico Ambiental

**Director del Proyecto
ROSA MARIA HIGUERA ARDILA
*Química, Especialista en Ingeniería Ambiental***

**Codirector
OLGA LUCIA BAYONA AYALA
*Química, MSc. en Ingeniería Química***

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISION DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE QUÍMICA AMBIENTAL
FLORIDABLANCA
2016**

DEDICATORIA

A DIOS quien nos brindó lo necesario para cumplir con nuestra meta.

A nuestras familias, por la colaboración y el apoyo que nos brindaron en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora Rosa María Higuera Ardila y codirectora Olga Lucia Bayona Ayala por dirigirnos durante la realización de este proyecto, por su confianza, dedicación y colaboración.

A nuestros padres que nos apoyaron en nuestro pasó por esta alma máter.

Al personal docente por trasmitirnos sus conocimientos y formarnos como químicos ambientales.

Finalmente a Carolina Palacio Carreño por su total y continuo apoyo porque sin este no sería posible alcanzar tantos logros.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
4. MARCO REFERENCIAL.....	20
4.1 MARCO TEÓRICO	20
4.1.1 Minería en Latinoamérica.	20
4.1.2 Minería en Colombia.	20
4.1.3 Minería en Santander.	20
4.1.4 Minería en Vetas y California.	21
4.1.5 Localización del área de estudio.	21
4.1.6 Metales pesados.	24
4.1.7 Normatividad.	31
4.2 MARCO DE ANTECEDENTES	31
5. DISEÑO METODOLÓGICO	34
5.1 VERIFICACIÓN DE EQUIPO DE TRABAJO	34
5.2 METODOLOGÍA ANALÍTICA UTILIZADA.....	34
5.2.1 Muestreo.	34
5.2.2 Recolección de las muestras.	37
5.2.3 Tratamiento de las muestras.	37
5.2.4 Determinación de los metales en sedimentos.	38
5.2.5 Desarrollo de la estandarización.	38
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
6.1 METODO DE COBRE.	41
6.1.1 Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación.	41
6.1.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación.	41
6.1.3 Resultado de Cu en muestras de sedimentos..	42
6.2 METODO DE PLOMO.	44
6.2.1 Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación.	44
6.2.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación.:	45
6.2.3 Resultado de Pb en muestras de sedimentos.	45
6.3 METODO DE ZINC.	47
6.3.1 Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación.	47
6.3.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación.	48
6.3.3 Resultado de Zn en muestras de sedimentos.	48

6.4	METODO DE CROMO.....	50
6.4.1	Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación.	50
6.4.2	Determinación del límite de detección y de cuantificación.	50
6.4.3	Resultado de Cr en muestras de sedimentos.	51
6.5	METODO DE MERCURIO.....	52
6.5.1.	Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación.	52
6.5.2	Determinación del límite de detección y de cuantificación.	53
6.5.3	Resultado de Hg en muestras de sedimentos.	53
	CONCLUSIONES.....	56
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	58

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Efecto de los metales pesados sobre la salud.	27
Tabla 2 Valores Guía para la Calidad de sedimentos extraídos de la legislación Canadiense.	31
Tabla 3 Concentraciones máximas de metales pesados en sedimentos de los Sitios del río Lot, Francia.	31
Tabla 4. Concentraciones de los metales pesados en los sedimentos de la Costa Karachi, Pakistán.....	32
Tabla 5. Concentraciones de los metales pesados en los sedimentos del río Piscina, Italia.	32
Tabla 6. Concentraciones de metales pesados en sedimentos en Bangladesh.....	33
Tabla 7. Concentración de mgCu/Kg en los sedimentos.	43
Tabla 8. Concentración de mgPb/Kg en los sedimentos.	46
Tabla 9. Concentración de mgZn/Kg en los sedimentos.....	48
Tabla 10. Concentración de mgCr/Kg en los sedimentos.	51
Tabla 11. Concentración de mgHg/Kg en los sedimentos.	54

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Flujograma de la Operación “formal” de minería de Vetas y california.	22
Figura 2. Equipo de absorción atómica acoplado al generador de hidruros.	34
Figura 3: Localización de área de estudio.	36
Figura 4. Toma de Muestra.	37
Figura 5. Tratamiento de la muestra.	37
Figura 6. Curva de trabajo de Cobre.	41
Figura 7. Concentración de Cobre en sedimentos comparado con la norma Canadiense.	43
Figura 8. Curvas de trabajo de Plomo.	44
Figura 9: Concentración de Plomo en sedimentos comparado con la norma Canadiense.	46
Figura 10. Curva de Trabajo de Zinc.	47
Figura 11. . Concentración de Zinc en sedimentos comparado con la norma Canadiense	49
Figura 12. Curva de Trabajo Cromo.	50
Figura 13. . Concentración de Cromo en sedimentos comparado con la norma Canadiense.	52
Figura 14. Curva de trabajo de Mercurio.	53
Figura 15. Concentración de mercurio en sedimentos comparado con la norma Canadiense.	54

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Condiciones de lectura para metales del equipo AAS.	65
Anexo B Concentraciones para curvas de calibración según el rango lineal.	66
Anexo C. Absorbancias de blancos: determinación límite de detección.	67
Anexo D: Valores de la distribución t (99%) para calcular LD.	68
Anexo E. Concentración conocida: determinación límite de cuantificación.	69
Anexo F. (Continuación) Concentración conocida: determinación límite de cuantificación.	70
Anexo G. Volúmenes de acuerdo al rango de concentración.	71
Anexo H. Valores t para el 95% de rechazo de Datos.	72
Anexo I. Curva de calibración de cobre.	73
Anexo J. Concentración Cobre en sedimentos por triplicado día 18/07/2016.	74
Anexo K. (Continuación) Concentración de cobre en sedimentos por triplicado día 09/08/2016.	75
Anexo L. (Continuación) Concentración de cobre en sedimentos por triplicado día 13/09/2016.	76
Anexo M. Curva de calibración de Plomo.	77
Anexo N. Concentración de plomo en los sedimentos por triplicado día 21/07/2016.	78
Anexo O. (Continuación) Concentración de plomo en los sedimentos por triplicado día 11/08/2016.	79
Anexo P. (Continuación) Concentración de plomo en los sedimentos por triplicado día 15/09/2016.	80

Anexo Q. Curva de calibración de Zinc.	81
Anexo R. Concentración de Zinc en los sedimentos por triplicado día 22/07/2016.....	82
Anexo S. (Continuación) Concentración de Zinc en los sedimentos por triplicado día 12/08/2016.....	83
Anexo T. (Continuación) Concentración de Zinc en los sedimentos por triplicado día 12/09/2016.....	84
Anexo U. Curva de calibración de Cromo.	85
Anexo V. (Continuación) Concentración de Cromo en los sedimentos por triplicado día 26/07/2016.....	86
Anexo W. (Continuación) Concentración de Cromo en los sedimentos por triplicado día 18/08/2016	87
Anexo X. (Continuación) Concentración de Cromo en los sedimentos por triplicado día 22/09/2016 2.....	88
Anexo Y. Curva de calibración de mercurio.	89
Anexo Z. Conversión de $\mu\text{gHg/L}$ en mgHg/Kg de los sedimentos día 23/09/2016.....	90

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AAS: Espectrometría de Absorción Atómica.

CDMB: Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

CV-AAS: Espectrometría de Absorción Atómica Vapor-Frío.

ICP-MS: Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

HG-AAS: Espectrometría de Absorción Atómica con Generador de Hidruros.

TXRF: Espectroscópica de Fluorescencia de Rayos-X por reflexión total

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe

RV05: Río Vetas punto 5

RV02: Río Vetas punto 2

RSp: Río Suratá la playa

QB: Quebrada la Baja

GLOSARIO

BLANCO: Matriz que no contiene el analito de interés u objetivo para el método Seleccionado.

ESTANDARIZACIÓN: Proceso riguroso que tiene como objetivo establecer o definir las condiciones de análisis en que se pretende cuantificar un analito.

EXACTITUD: Grado de aproximación entre el valor obtenido experimentalmente y el valor aceptado.

LINEALIDAD: Proporcionalidad entre la concentración y la señal producida por el instrumento.

LÍMITE DE DETECCIÓN: Pequeña cantidad detectable por encima del ruido de un procedimiento y dentro del límite declarado de aceptación; este último se establece de modo que las probabilidades en que se presenten errores de tipo I (falso positivo) y tipo II (falso negativo) sean razonablemente pequeñas.

LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN: Concentración de analito que produce una señal suficientemente fuerte que el blanco, de tal manera que puede ser detectada con un nivel específico de fiabilidad durante las operaciones de rutina. Típicamente, es la concentración que produce una señal de 10 segundos sobre el agua reactiva señal en blanco, y debe tener una precisión definida y sesgo en ese nivel.

PATRÓN: Preparados en el laboratorio, y por lo menos un patrón externo certificado.

PRECISIÓN: Indica el grado de concordancia entre los resultados obtenidos para las réplicas en una misma muestra, aplicando el mismo procedimiento experimental bajo las condiciones prefijadas. Usualmente, se expresa en términos de desviación estándar.

SELECTIVIDAD: Es el grado en que un método puede cuantificar o cualificar al analito en presencia de interferentes. Estos interferentes normal o frecuentemente se encuentran en la matriz de interés.

SENSIBILIDAD: Medida del factor de respuesta del instrumento como una función de la concentración. Normalmente, se mide como la pendiente de la curva de calibración. Como valor se puede reportar el promedio para las curvas obtenidas en los ensayos de estandarización y en la medición de muestras, indicando su desviación estándar.

RESUMEN

La minería en Vetas y California se realiza en gran parte con métodos rudimentarios denominada minería artesanal o tradicional. Debido a estos métodos para la extracción de oro se aumenta el volumen de sedimentos y el riesgo por contaminación de metales pesados de la quebrada La Baja y el río Vetas afluentes del río Suratá. El caudal de este último es utilizado en gran parte para la planta de tratamiento de Bosconia que distribuye agua al área metropolitana de Bucaramanga. Como la salud de las personas dedicadas a la minería se ve expuesta y se genera contaminación en los acuíferos antes nombrados, se realizó la investigación para determinar la presencia de metales pesados como Cu, Pb, Zn, Cr y Hg en sedimentos de los ríos Vetas y Suratá y en la quebrada La Baja.

Se hizo uso de las metodologías del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se tomaron cuatro puntos de muestreo de sedimentos, tomando como referencia puntos determinados por la CDMB autoridad ambiental, encontrados en la literatura. Los análisis de Cu, Zn, Pb y Cr se realizaron en el laboratorio de ciencias básicas de la Universidad Santo Tomás con el equipo de absorción atómica y el laboratorio SIAMA LTDA realizó el análisis de Hg. Los metales que sobrepasaron los valores admitidos por la norma canadiense titulada Directrices de calidad de sedimentos canadienses para la protección de la vida acuática fueron Cu, Zn, Pb y Hg.

PALABRAS CLAVE: Minería, metales pesados, sedimentos, absorción atómica.

ABSTRACT

The mining industry in Seams and California realizes largely with rudimentary methods named handcrafted or traditional mining industry. Due to these methods for the golden extraction there increases the volume of sediments and the risk for pollution of heavy metals of the gully The Fall and the river affluent Seams of the river Suratá. The flow of the latter is used largely for the plant of Bosconia's treatment that distributes water to Bucaramanga's metropolitan area. Since the health of the persons dedicated to the mining industry meets exposed and pollution is generated in the aquiferous ones before renowned, the investigation was realized to determine the presence of metals weighed as Cu, Pb, Zn, Cr and Hg in sediments of the rivers Seams and Suratá and in the gully The Fall.

One used of the methodologies of the Standard Methods for the Examination of Water closet and Wastewater and of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM). Four points of sampling sediment took, taking points determined by the CDMB as a reference environmental authority, found in the literature. The analyses of Cu, Zn, Pb and Cr were realized in the laboratory of basic sciences of the University Saint Thomas by the equipment of atomic absorption and the laboratory SIAMA LTDA realized Hg's analysis. The metals that exceeded the values admitted by the Canadian qualified norm Qualit directives of Canadian sediments for the protection of the aquatic life were Cu, Zn, Pb and Hg.

KEY WORDS: Mining, heavy metals, sediments, atomic absorption.

INTRODUCCIÓN

Los metales pesados se introducen a los cuerpos de agua como resultado de procesos naturales y antropogénicos, estos últimos son los que más contribuyen a la contaminación del medio ambiente. Entre los metales pesados más comunes se encuentran As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Se y Zn; se caracterizan por su toxicidad, persistencia y acumulación en los tejidos de los organismos vivos.¹

Se han realizado estudios de metales pesados en sedimentos, para identificar la presencia de los mismos y su concentración total en las corrientes hídricas; estos metales interactúan a través de procesos físicos, químicos y biológicos y son retenidos o acumulados dentro del sedimento.²

En Colombia, las fuentes hídricas han sido afectadas por las actividades industriales, como el caso de la minería. La minería es un eje de la economía para los municipios donde esta tiene lugar y a nivel nacional ocupa el quinto lugar como actividad económica³. Los municipios de Vetas y California, son distritos mineros de oro y plata; esta minería se ha desarrollado en forma artesanal y a pequeña escala por tradición⁴. Los métodos de extracción y beneficio del mineral son rudimentarios, estos aumentan el volumen de sedimentos afectando directamente la quebrada La Baja y el río Vetas que son afluentes del río Suratá.⁵

Este trabajo de grado fue encaminado a determinar el contenido de metales pesados en sedimentos generados por la actividad minera de los Distritos de Vetas y California. Para ello, se usó el método de Absorción Atómica y los metales pesados estudiados fueron: Cu, Pb, Zn, Cr, y Hg. Los análisis para Cu, Pb, Zn y Cr, se desarrollaron en los laboratorios de investigación de la facultad de Química Ambiental de la Universidad Santo Tomás y en el laboratorio SIAMA LTDA, para el caso del mercurio (Hg). Como referencia se utilizaron el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater y los protocolos del IDEAM.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación de metales pesados en las fuentes hídricas es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación en los últimos años debido a su capacidad de incorporarse a la cadena trófica, su persistencia y toxicidad¹. La actividad minera ha sido una de las principales fuentes de contaminación de metales pesados en los cuerpos hídricos. El río Reedy de Estados Unidos, el río Hindo de India y el río Xanaes de Argentina, son ejemplos de contaminación de metales pesados⁶.

El recurso hídrico de los municipios de Vetas y California se ve afectado por la actividad minera. El principal problema de esta zona se ha caracterizado por el vertimiento directo de líquidos y sólidos como consecuencia de la extracción y beneficio del mineral en la quebrada La Baja y el río Vetas⁷ donde se encuentra la mayor parte de la pequeña y mediana minería que se desarrolla en los municipios⁸. Estas fuentes hídricas finalmente entregan sus aguas al río Suratá⁹, parte del agua de esta cuenca es tratada en la planta de Bosconia y es distribuida al área metropolitana de Bucaramanga⁷.

Los metales pesados en las fuentes hídricas pueden causar problemas de salud pública, cada metal contaminante tiene un mecanismo de acción y un lugar de acumulación dentro del organismo de un ser vivo; el más conocido es el Pb que afecta el sistema nervioso y la médula ósea. Para prevenir que las personas tengan contacto directo con estos metales se debe conocer las posibles fuentes de contaminación¹⁰. El análisis de metales pesados en sedimentos en la región aún no se ha realizado, a excepción del Hg analizado por la CDMB en el río Suratá. Por esta razón, se determinó el contenido de metales pesados en los sedimentos de la quebrada La Baja, el río Vetas y Suratá, con el fin de conocer el estado de estos cuerpos de agua.

2. JUSTIFICACIÓN

Los sedimentos en las fuentes hídricas son reservorios de contaminantes que pueden ser movilizados por ciertas condiciones ambientales. Los metales pesados adsorbidos en los sedimentos pueden ser liberados de nuevo a la columna de agua, causando contaminación secundaria. Estos contaminantes tienen una acción directa sobre la fauna acuática y efectos adversos para la salud⁶.

En los municipios de Vetás y California (Santander - Colombia), se trabaja la minería en forma artesanal desde hace muchos años, siendo el agua el recurso de mayor utilización en esta actividad. Los sólidos generados se deben a la extracción, beneficio y recuperación del oro. Estos se vierten a la quebrada La Baja y el río Vetás, aumentando el volumen de sedimentación, los cuales son fuentes de contaminación por la presencia de metales pesados^{5,7}.

La quebrada La Baja es un afluente del río Vetás y este a su vez del río Suratá. Unos 40 km más abajo está localizada la planta de tratamiento de agua potable Bosconia, que capta el agua del río Suratá y abastece la zona Norte de Bucaramanga⁷. El análisis de los sedimentos es considerado como un aspecto importante dentro del estudio de la calidad del agua, ya que permite relacionarlos con el contenido de metales pesados que hay en ella. En la actualidad no se han realizado estudios sobre sedimentos en las fuentes hídricas que utilizan los distritos mineros para extracción del mineral; con este trabajo se permitió conocer el contenido de metales pesados en los sedimentos de la quebrada La Baja, el río Vetás y Suratá antes de la captación de agua para la planta de tratamiento Bosconia.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el contenido de metales pesados en sedimentos generados por la actividad minera en los municipios de Vetás y California, del departamento de Santander, utilizando la técnica de Absorción Atómica con llama para los metales de Cobre, Cromo, Plomo y Zinc, y con vapor frío para el Mercurio.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definir y estandarizar los métodos a utilizar para la identificación de los metales de estudio.

Reconocer los puntos para la toma de muestras y los métodos para la preservación de las muestras.

Determinar las concentraciones de Cu, Pb, Zn, Cr y Hg en sedimentos de la zona estudiada.

Analizar los resultados y compararlos con la norma canadiense Directrices de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Minería en Latinoamérica. En las últimas décadas América latina ha sido uno de los principales territorios de expansión de minería a nivel global, se ha proyectado en la extracción de minerales debido al incremento del precio de estos productos básicos (Oro, Cobre, Uranio, Zinc, Plomo y Molibdeno) que atraen inversiones de grande, mediana y pequeña minería¹¹. Para Chile, Perú y Bolivia las exportaciones de minerales duros forman un renglón importante de su economía; según la CEPAL, la minería aporta al menos 3% de empleo en estos países¹¹. En otras regiones de América latina el sector ha sido demasiado pequeño para impulsar el desarrollo nacional.

Sin embargo, la extracción de estos minerales en algunos países ha causado problemas ambientales, en Tambogrande-Perú la actividad minera fue suspendida, ya que la minería se encontraba debajo de la ciudad. Otro caso fue el proyecto de Kimsakocha ubicado en Ecuador, que generó un conflicto de inconformidad entre los habitantes que han sido afectados por la explotación de minería a cielo abierto por la empresa canadiense Junior¹¹.

El proyecto de Esquel, realizado en Argentina por la empresa Meridian Gold junior de Estados Unidos fue suspendido por que tenía la intención de extraer un depósito de oro / plata que se encontraba a 65 km de la ciudad y la consecuencia principal era la contaminación del recurso hídrico¹².

4.1.2 Minería en Colombia. La actividad minera representa una parte significativa del desarrollo económico del país; está basada en la producción de carbón, níquel, oro, platino, esmeraldas, caliza, sal, rocas fosfóricas, arcillas, arenas silíceas, los minerales de manganeso y cobre entre otros¹³. Colombia es reconocida a nivel mundial por tener las mayores reservas de carbón en Latinoamérica¹⁴. La minería dentro del territorio colombiano se conoce como distritos mineros, abarcan más de 250 municipios en constante crecimiento y exploración¹³. En el caso de explotación de oro los departamentos de Cauca, Nariño, Antioquia, Vaupés, Tolima, Huila, Caldas y Santander, son los de mayor potencial de este mineral¹⁵

4.1.3 Minería en Santander. Históricamente Santander ha sido un departamento minero, ocupa el quinto puesto a nivel nacional con 653 títulos otorgados por la Agencia Nacional Minera con un área aproximada de 328.530 Hectáreas³. La actividad minera ha sido desarrolla en diferentes regiones especialmente en los municipios de Vetas y California. Los minerales que se encuentran en el

departamento son: metales preciosos, carbón, materiales de construcción, caliza, arcilla, yeso, roca fosfórica, material de arrastre entre otros; la explotación de estos minerales ha contribuido a la economía de la región¹⁶.

4.1.4 Minería en Vetas y California. Los distritos mineros de Vetas y California, son municipios del departamento Santander, tienen una extensión de 139Km² se dividen en cabeceras municipales y zonas rurales. Estos dos municipios han sido de tradición minera y la mayoría de su población ejerce esta actividad¹⁷.

La geología de esta zona está constituida por rocas ígneas de la prehistoria conformadas por grano dioritas, cuarzomonzonitas y cuarzomonzodioritas que son claves en los yacimientos de oro¹⁷. El estudio de mineralización da a conocer que en Vetas se encuentra oro grueso, mientras que en California oro delgado y minerales de cobre (calcopirita, calcosina, covelina, digenita y bornita), de arsénico As (enargita y tenantita), antimonio Sb (tetraedrita), sulfuros de plomo (galena), de zinc (esferulito, wurtzita)⁴ debido a las características de los suelos de estos distritos los mineros utilizan mercurio y cianuro, para la extracción del mineral⁴. En un estudio de petroquímica de rocas ígneas en estos distritos se encontró presencia de metales trazas y en mayor abundancia plomo (Pb)¹⁸.

La pequeña y mediana minería que se desarrolla en estos distritos genera empleo muchos habitantes de la región, sin embargo estos carecen de tecnología y por su baja capacidad de gestión e informalidad, conllevan a generar impactos ambientales en aguas, suelos y aire⁸.

4.1.5 Localización del área de estudio. El área de estudio comprende la subcuenca quebrada La Baja, el río Vetas y el río Suratá ubicado al Noreste de la ciudad de Bucaramanga, en los municipios de Vetas y California. La quebrada La Baja, nace de la vereda Angostura de la intersección de las quebradas Angosturas y Páez, de California; esta quebrada va en dirección aproximada sureste hasta llegar al río Vetas, a partir de este punto el río Vetas va en dirección Noreste, hasta llegar al río Suratá⁹.

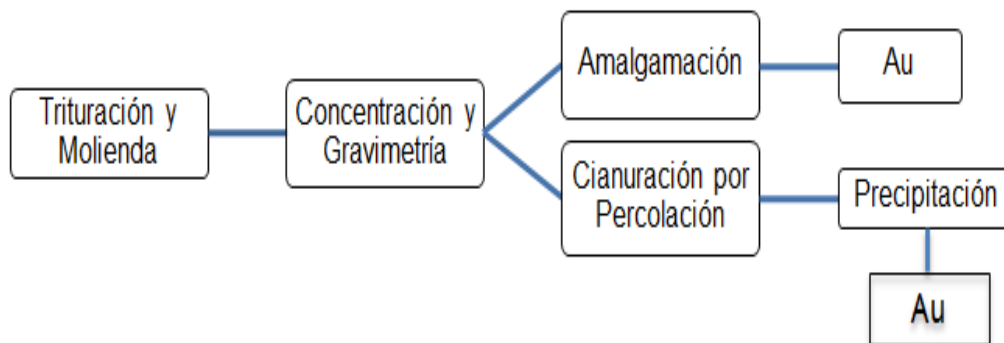
El río Suratá nace en el páramo de Monsalve y corre en dirección Noreste-Sureste por el estrecho cañón de las cuchillas de Magueyes y del Común para desembocar en el río de Oro. Sus principales afluentes son los ríos Vetas, Charta y Tona, siendo este último el mayor aportante en área y caudal. Su longitud es de 59,6 km hasta el puente de la fábrica de cementos¹⁹. Sus aguas son tratadas en la planta de tratamiento de Bosconia⁷.

4.1.5.1 Extracción de oro (Au). En los municipios de Vetas - California, se lleva a cabo dos tipos de operaciones tradicionales o artesanales para la extracción del

mineral; el conocido como el sector formal en el que se utilizan amalgamación y cianuración²⁰ (Figura 1); y el sector informal llamado “barrileros” que extraen el oro con operaciones simultáneas de molienda y amalgamación y las colas del proceso son almacenadas para cianuración por percolación en pequeñas tinas o barriles⁷.

En muchas de las etapas de la extracción y beneficio del mineral se genera baja eficiencia perdiendo parte del mismo mineral⁷. El mineral aurífero al momento de su extracción no se encuentra solo, contiene otros metales entre ellos: hierro, cobre, zinc, plata, arsénico y otros en menor cantidad. Estos metales son liberados al medio ambiente en el momento en que el oro entra al proceso de amalgamación y cianuración para su respectiva extracción²¹

Figura 1. Flujograma de la Operación “formal” de minería de Vetas y california.



Fuente: Wolff Carreño Erwin, Incorporación de tecnologías limpias para beneficiar minerales auríferos de la pequeña minería de Vetas y California (Santander), buscando reducir vertimientos de mercurio y cianuro.

4.1.5.2 Proceso de amalgamación. El mercurio es el metal más empleado para la extracción de metales preciosos, gracias a su propiedad física de ligar rápidamente con oro y plata. La técnica de amalgamación consiste en adicionar cantidades de mercurio sobre los minerales ya tratados (molidos o pulverizados), después de realizar una serie de movimientos a la muestra, con el fin de que los minerales interactúen con el Hg. Después la muestra se coloca sobre mallas muy finas y mediante presión se retira el exceso de mercurio ²².

Una vez realizado el proceso, la afinidad que existe entre el oro y mercurio produce una pasta blanca brillante llamada amalgama; para que ocurra una buena amalgamación es necesario que el mercurio esté libre de impurezas, la amalgama obtenida de esta forma es una mezcla homogénea de Au y otros metales. Ninguno de estos pierde sus propiedades que los caracterizan²².

La amalgama es recuperada mediante el lavado y su separación del mineral molido es de tipo gravimétrico; una vez la pasta brillante está seca se coloca sobre

recipientes metálicos expuesta a la llama evaporando de esta manera el mercurio, parte del cual se condensa y es recuperado. Los metales preciosos forman una esponja. Los vapores de mercurio que no se condensan pasan directamente al medio ambiente ²².

4.1.5.3 Proceso de cianuración. El cianuro es utilizado en la minería para la recuperación de oro, plata y platino del resto del material removido por el cual se separan los componentes solubles del material sólido inerte. Es una sustancia química que se descompone una vez interactúa con el agua; se conoce varias formas de cianuro entre los complejos fuertes y débiles. Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de Cd, Cu, Zn y Ni entre otros. El grado de disociación depende del pH de la solución²³.

El uso de cianuro en la extracción del mineral aurífero es importante debido a su capacidad de disolver el oro y otros metales, sin embargo los subproductos del proceso de cianuración y posterior precipitación de oro son soluciones acuosas con un alto contenido de cianuro libre e iones complejos de cianuro que son altamente tóxicos²¹.

Cuando en la minería artesanal se realiza la cianuración, las arenas y lodos se mezclan con cianuro y el contenido de oro que está retenido en las muestras pasa a la solución en estado iónico; luego la solución enriquecida con metales preciosos se coloca sobre virutas o polvo de zinc para precipitar el oro. Una vez precipitado el oro se coloca sobre recipientes metálicos y se somete a calentamiento hasta lograr una pasta totalmente seca; en esta operación no solo se evapora el agua sino las soluciones de cianuro y parte del mercurio que se haya precipitado sobre el zinc²².

Una vez el precipitado este seco se pasa a fundición y refinación del oro al igual que los demás metales obtenidos, para el proceso de fundir se agrega bórax, carbonato de sodio y nitrato de potasio, la mezcla obtenida se introduce en un horno durante 1½ a 2 horas a una temperatura aproximada de 1.200 °C, con el fin de obtener la fundición del material y en un molde metálico separar el metal de interés de los demás²².

Finalmente el oro pasa a un proceso de separación química mediante la adición de ácido nítrico o en combinaciones de ácido nítrico, sulfúrico y clorhídrico; el oro una vez separado de la solución se le adiciona Cu y Fe entre otros metales, para volver a fundir y eliminar así, los metales adicionados hasta obtener un oro puro. Las soluciones empobrecidas de los minerales preciosos son arrojadas en suelos y fuentes hídricas sin tratamiento previo^{22,24}

4.1.6 Metales pesados

4.1.6.1 Aspectos generales de los Metales Pesados. Metal pesado es el término usado para el grupo de metales y metaloides con densidad igual o mayor de 6g/cm^3 cuando están en estado elemental²⁵, son componentes naturales de la corteza terrestre, así mismo son persistentes en el ambiente²⁶, algunos de ellos son llamados elementos traza y su abundancia en la corteza terrestre es de 0.1% ²⁷.

Los metales pesados como el cobre (Cu), el plomo (Pb), el mercurio (Hg), entre otros, se conocen por su alta conductividad eléctrica, y la capacidad de desplazarse hacia los metales preciosos (oro, y plata). Sus óxidos metálicos se hacen más estables que los hidróxidos correspondientes; además forman complejos con diferentes iones y moléculas²⁷. La mayor parte de los metales tiende a estar disponibles en pH ácidos²⁸.

La dinámica de los metales pesados en el ambiente es amplia y depende de su naturaleza química, física y de los cambios a los que están sujetos en los ecosistemas. ²⁸ Estos se vuelven contaminantes en las fuentes de agua ya que tienden a formar asociaciones con sustancias minerales y orgánicas por medio de intercambio iónico, adsorción, entre otros, depositándose en los sedimentos^{10,28}, son inertes en el entorno del sedimento²⁹. El contenido, de contaminantes en los sedimentos puede cambiar dependiendo de la mineralogía, contenido de la materia orgánica y distribución del tamaño del grano²⁸⁻³⁰.

Los metales pesados son los contaminantes más estudiados en los cuerpos de agua por su capacidad de bioacumulación, toxicidad y los efectos adversos a la fauna acuática y a la salud de las personas³¹. Los elementos químicos metálicos de mayor importancia toxicológica y ecotoxicológica son: Hg, As, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn; la ingesta de estos metales depende del hábitat, algunos organismos adquieren los metales al ingerir partículas sedimentarias y aguas asociadas a los polos de los sedimentos³². Además los metales pesados no son biodegradables y por consiguiente no se puede eliminar de los cuerpos de agua por procesos naturales³¹

Cobre (Cu)

El cobre está presente en diversas formas y concentraciones en la corteza terrestre, océanos, lagos y ríos; este elemento es esencial para el desarrollo de plantas y animales incluso seres humanos en cantidades pequeñas³³. El cobre es liberado al medio ambiente en forma natural y antropogénica, entre las fuentes naturales están los volcanes, vegetación en descomposición e incendios forestales³³. En los océanos los peces y organismos muertos se depositan en el fondo formando sedimentos ricos en cobre y otros compuestos orgánicos³⁴. Las actividades

mineras, metalúrgicas, agrícolas, la incineración de basuras urbanas entre otras son fuentes antropogénicas del cobre^{33,34}.

El cobre liberado al medio ambiente generalmente se adhiere a partículas de materia orgánica, arcilla, tierra o arena. La biodisponibilidad de cobre depende de factores como: el pH y la dureza del agua en la que está presente. Algunos sedimentos y metales reaccionan en contacto con el cobre y lo 'atrapan' reduciendo su biodisponibilidad³³.

Cromo (Cr)

El cromo es un elemento que está distribuido en la corteza terrestre; en la naturaleza no se encuentra en estado libre, se halla como constituyente en diferentes minerales³⁵; sus principales estados de oxidación son: el trivalente Cr^{3+} y hexavalente Cr^{6+} , este último es móvil y tóxico para los organismos vivos mientras que el Cr^{3+} es inmóvil y se considera un elemento traza esencial en el metabolismo humano³⁶. Ambas especies de cromo (Cr^{3+} , Cr^{6+}), pueden coexistir en cuerpos de agua y suelos dependiendo del pH del medio de sus características de oxidación – reducción³⁵.

La cinemática de las reacciones redox de Cr dificulta el transporte del mismo, ya que cada especie de este elemento químico presenta un comportamiento de adsorción diferente dependiendo de las condiciones fisicoquímicas. Una cantidad estimable de este metal se asocia con óxidos de hierro, minerales de arcilla y espinelas como magnetita entre otros. Los procesos de liberación de cromo en el medio ambiente es el resultado de las actividades antropogénicas (industriales, y fertilizantes de fósforo)³⁶.

Mercurio (Hg)

El mercurio es uno de los metales con más estudio en contaminación de los ecosistemas acuáticos (agua y sedimento), debido a su naturaleza tóxica y bioacumulación en los organismos vivos³⁷. Este elemento liberado al medio ambiente por fuentes naturales y actividades antropogénicas, finalmente es transportado a los cuerpos de agua a través de los ríos y las precipitaciones atmosféricas^{37,38}.

Existe en tres formas: mercurio elemental (Hg^0), es volátil y transportado en la atmósfera a través de largas distancias. Mercurio inorgánico bivalente (Hg^{2+}), está presente en la corteza terrestre y océano. Por último el mercurio disuelto, se adsorbe sobre las partículas en suspensión y, en consecuencia, se acumula en los sedimentos y suelos³⁷. Los procesos de coagulación, floculación y co-precipitación también pueden provocar la remoción de Hg de la columna de agua y pasar a los

sedimentos debido a los cambios en el pH y la salinidad de las aguas durante la mezcla. También, factores como la textura, la distribución de las diferentes fases minerales, la calidad y cantidad de materia orgánica y el estado redox contribuyen a la acumulación del Hg en el sedimento^{38,39}.

Plomo (Pb)

El plomo es un metal de color blanco azulado con tendencia a gris plateado, en estado elemental es blando de fácil manejo y mal conductor de electricidad⁴⁰. Se encuentra en los suelos, plantas y aguas a nivel traza. Los principales minerales de Pb son la galena (PbS), y cerusita (PbCO₃), anglesita (PbSO₄) y piromorfita (Pb₅(PO₄)₃Cl), son de menor importancia, pero, se presentan con frecuencia²⁵. Los compuestos de Pb⁺² son más estables que el Pb⁺⁴ excepto el nitrato y acetato de plomo, la mayor parte de sus compuestos son insolubles⁴⁰.

El plomo es un sustituyente natural del suelo, su proliferación al medio ambiente se debe a las actividades antropogénicas (soldaduras, aleaciones y principalmente como agente antidetonante para la liberación de gasolina)^{32,40}. Una vez que este metal se deposita en el suelo, queda mayor parte retenido en la capa superficial de 2-5 cm de profundidad en especial en suelos con un contenido de más de 5% de materia orgánica y un pH mayor de 5. El plomo se adsorbe fuertemente en suelos, sedimentos, en especial en arcillas, limos y óxidos de Hierro y Manganeseo, esta adsorción se debe tanto a interacciones electrostáticas como a la formación de enlaces específicos³².

La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha incluido el plomo en la lista de los diez productos químicos más perjudiciales para la salud, especialmente para los niños que son más vulnerables ante este contaminante⁴¹. La OMS, ha realizado una serie de directrices para la prevención y tratamiento de la intoxicación por este metal⁴¹.

Zinc (Zn)

El Zn es uno de los elementos que se encuentra en la corteza terrestre, clasificado como metal de transición tiene un parecido similar al magnesio y el berilio. Este metal puede combinarse con otros elementos por ejemplo cloro, oxígeno y azufre para formar compuestos de zinc; gran parte de este metal se encuentra en forma natural en el ambiente. Este elemento químico forma también compuestos de coordinación, unidad fundamental es el ion del zinc, rodeado por cuatro grupos coordinados dispuestos espacialmente en las esquinas de un tetraedro regular^{42,43}

El Zn es liberado al medioambiente por actividades como la minería, la refinación de minerales de zinc, plomo y cadmio, la producción de acero entre otros. La mayor

parte del Zn en los cuerpos de agua se deposita en el fondo. Sin embargo, una cantidad representativa puede estar en forma disuelta en el agua o suspendida en partículas finas. Esta pequeña cantidad en el agua puede aumentar a medida que la acidez del agua aumenta ^{42,43}.

4.1.6.2 Metales pesados en la salud. La contaminación de los cuerpos de agua y sedimentos por metales pesados ha sido uno de los principales problemas ambientales²⁶. La concentración de estos contaminantes en las fuentes hídricas y sedimentos en cantidades pequeñas puede causar efectos nocivos, graves, crónicos e incluso letales sobre los organismos vivos²⁸. Los metales pesados son liberados al medio ambiente de forma natural o por las actividades antropogénicas y pueden ingresar al cuerpo humano por tres vías de administración: ingestión, inhalación y contacto con la piel²⁵.

La toxicidad de un metal depende de su vía de administración y del compuesto químico al que está ligado. Los efectos tóxicos de los metales pesados no se detectan a corto plazo, aunque puede haber una incidencia a mediano y largo plazo. El riesgo por contaminación de metales pesados en los organismos vivos, depende principalmente del nivel de acumulación en el cuerpo. Son mayores los riesgos si el tiempo de exposición del organismo es prolongada²⁸.

Se ha evidenciado que los metales pesados están relacionados con enfermedades cardiovasculares, hígado, vejiga, riñón, sistema nervioso, sangre, huesos²⁶, retraso del crecimiento intrauterino, afectación de las defensas inmunológicas, problemas psico-sociales y también considerados cancerígenos⁴⁴. (Tabla 1)

Tabla 1. Efecto de los metales pesados sobre la salud.

Metal	Símbolo químico	Efectos sobre la salud
Cobre	Cu	Irritación de la nariz, garganta, daños en el hígado y riñones ³³
Cromo	Cr	Hipertrofia de cornetes e irritación de mucosa y dermis. El Cromo IV, es la forma más toxica, produciendo efectos cancerígenos, Genotoxicos entre otros.
Mercurio	Hg	Neurológicos (temblor, trastorno de coordinación, disminución visual, cefalea y pérdida de memoria) otras malformaciones congénitas, abortos, muerte perinatal entre otros.
Plomo	Pb	Alteraciones a nivel hematológico, cardiovascular y renal. También, pérdida de fuerza memoria, insomnio, irritabilidad, palidez mucocutanea y otros.
Zinc	Zn	Pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olor. Irritación en la piel, pequeñas llagas y erupciones cutáneas. Defectos de nacimiento

Autores: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diagnóstico Nacional de salud Ambiental⁴⁴, 2012

4.1.6.3 Metales pesados en el medio ambiente

a. Impacto en el recurso hídrico

En Vetas y California, el agua es el recurso de mayor utilización en la actividad minera, el aumento de sólidos en suspensión y sólidos residuales en las fuentes hídricas es debido a la extracción, beneficio y recuperación del oro. Los cuerpos de agua (quebrada La Baja y río Vetas) utilizados para las explotaciones mineras son fuentes de contaminación por la presencia de metales pesados que contienen; estas aguas son vertidas al río Suratá⁵.

Las aguas residuales generadas en la extracción del mineral, contienen sólidos en suspensión (lodos, arenas, sulfuros), y sales disueltas que aumentan el volumen de sedimentación, así mismo, la presencia de sulfuros y sulfatos generan cambios de pH afectando la flora y la fauna acuática. Además, hay vertimiento de Hg y cianuro utilizados para el proceso de extracción del mineral^{5,8}

b. Sedimentos

Los sedimentos son una mezcla heterogénea que contiene metales pesados, debido a su resistencia química e incluye tanto minerales como materia orgánica⁴⁵. En los últimos años han tomado importancia en el estudio de la contaminación de los cuerpos de agua, estos brindan la información necesaria para saber la concentración y el comportamiento de los agentes contaminantes y su relación con la zona estudiada⁴¹; se utilizan como herramientas de monitoreo en las primeras fases de evaluación ambiental de los ecosistemas acuáticos⁴¹.

Los sedimentos en aguas presentan las mismas características de unión que en el suelo, muchos metales que están en forma de suspensión tienden a ser depositados en el sedimento de las fuentes hídricas^{45,46}. La acumulación de los metales pesados en los sedimentos no solo depende de las fuentes antropogénicas y litogénicas, sino también de las características de textura, condición redox del fondo y de la actividad microbiana, que determinan la asociación de los metales con la matriz del sedimento^{29,40}.

El sedimento es una parte integral de la dinámica de las fuentes hídricas, la movilidad, biodisponibilidad y ecotoxicidad, dependen de la unión del metal y las fases geoquímicas del sedimento^{47,48}. Durante el transporte, pueden sufrir varios cambios en su especiación debido a la disolución, precipitación y adsorción. La composición química de sedimento contiene algunos óxidos como Fe, Mn, Al, arcilla y contaminantes solubles como carbonato o sulfatos⁴⁵.

En ocasiones pueden ser contaminantes ya que los metales no van a estar todo el tiempo en el sedimento y pueden ser liberados a la columna de agua por los cambios de las condiciones ambientales como: de pH, redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos^{25,45}. El análisis de los metales pesados en sedimentos ayuda a determinar aquellos contaminantes que se pueden escapar de los análisis de agua¹.

c. Determinación de metales pesados en sedimentos

Toma de Muestra en Sedimentos

La toma de muestra de sedimentos en los ríos depende de la profundidad del mismo, pueden ser simples para corrientes pequeñas o integradas para corrientes grandes. Existen dos tipos de muestreo de sedimentos, el automático que permite tomar mejor la muestra y reducir los errores humano y el manual⁴⁹.

El muestreo manual, en algunos casos es realizado con palas, cuando las aguas son pocas profundas o aguas estáticas. El taladro manual, que consiste en una columna de acero inoxidable en forma de T, la profundidad para extraerla es aproximadamente de 2 pies o menos dependiendo del material y las personas que lo estén usando. El martillo resbalador, es usado para poca profundidad, o indirectamente por medio de un sistema de dragado entre otros⁵⁰.

Preparación de la Muestra

Para la preparación de las muestras se debe realizar una serie de procedimientos previos al análisis que permiten asegurar la calidad de los resultados. Los procedimientos que se realizan son: Secado, Molienda, Tamizado y Homogenización por último Cuarteo y Almacenamiento⁵⁰.

Técnica de Absorción Atómica

El método de espectrometría de Absorción Atómica (AAS), es empleado para determinar elementos en muestras analíticas, en particular metales pesados en diferentes matrices. Es reconocido por su sensibilidad, selectividad y bajo costo de operación. Entre algunas de sus aplicaciones se encuentra análisis de aguas, suelos, petroquímicos, en muestras de industrias químicas y farmacéuticas⁵⁰.

El principio de AAS se fundamenta en que cada elemento químico emite y absorbe radiación electromagnética a longitudes de ondas específicas de cada elemento, estos absorben la radiación en forma proporcional a su concentración atómica. La relación entre absorción y concentración se encuentra definida por la Ley de Lambert-Beer⁵⁰.

En este método los metales disueltos son llevados a su forma atómica elemental mediante calentamiento por una llama generada debido a una mezcla de gases

combustibles; las más usadas son aire-acetileno y óxido nitroso-acetileno, las temperaturas de las llamas van de 1900° C a 2800°C.⁵⁰.

Los componentes básicos de un equipo de absorción atómica son:

Fuente de radiación: La fuente de radiación característica debe tener tres propiedades fundamentales: Monocromaticidad, intensidad y estabilidad; que permite emitir una línea específica correspondiente a la necesaria para efectuar una transición en los átomos del elemento analizado^{51,52}.

Atomizador: Su función es convertir los átomos combinados de la muestra en átomos en estado fundamental⁵¹.

Monocromador: Su función es seleccionar la línea de absorción, separándola de las otras líneas de emisión emitidas por el cátodo hueco⁵².

Detector: Mide la intensidad de la radiación antes y después de la absorción por la muestra⁵².

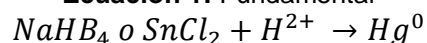
Amplificador: Amplifica la señal eléctrica producida para que en el siguiente paso pueda ser procesada con circuitos y sistemas electrónicos comunes.

Sistema de Lectura: permite que la señal de intensidad de corriente, sea convertida a una señal que el operario pueda interpretar⁵².

Técnica de Vapor-Frío (CV-AAS) y Generador de Hidruros

“La determinación de mercurio por medio de esta técnica consiste en adicionar un agente reductor (cloruro estañoso o borohidruro de sodio), al digerido. La reacción con el Hg en solución con el agente reductor produce mercurio atómico muy volátil. El vapor del Hg es conducido hacia una celda colocada en el paso del haz de luz en donde ocurre la interacción entre los átomos de mercurio y la radiación, produciéndose la absorción”⁵³.

Ecuación 1: Fundamental



El método de generador de hidruros acoplada al equipo AAS permite cuantificar elementos como As, Se, Hg, Sn, Sb, Ge, Bi y Te, en donde su sensibilidad es muy baja al ser determinados por llama directa. Este método se basa en tres etapas fundamentales: la generación y volatilización del hidruro, la transferencia del mismo y su posterior atomización en el espectrómetro de AAS⁵³.

Para la generación de los hidruros es muy utilizado los ácidos minerales fuertes en particular el HCl. La muestra disuelta en el ácido es mezclada con un agente reductor como el Borohidruro de sodio, esta reacción permite generar H atómico que interactúa con los metales en la solución para formar hidruros volátiles⁵³.

4.1.7 Normatividad. En el país no existe norma que establezca los estándares ambientales de los contaminantes en los sedimentos. Este trabajo tomara los valores de referencia de la legislación de Canadá⁵⁴. Los valores de esta norma se encuentran registrados en la tabla 2.

Tabla 2 Valores Guía para la Calidad de sedimentos extraídos de la legislación Canadiense.

Parámetros	Valores Guía para sedimentos mg/Kg
Cobre (Cu)	35.7
Cromo(Cr)	37.3
Plomo(Pb)	35.0
Mercurio (Hg)	0.17
Zinc (Zn)	123

Autor: Directrices de calidad de sedimentos canadienses para la protección de la vida acuática.

4.2 MARCO DE ANTECEDENTES

En varios países se han reportado fuentes hídricas contaminadas por metales pesados, ejemplo, en el río Lot, en Francia se determinó la concentración de metales pesados en sedimentos, esta fuente hídrica ha sido afectada por las actividades mineras presentes en el sector⁵⁵. Las concentraciones de metales en los sedimentos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3 Concentraciones máximas de metales pesados en sedimentos de los Sitios del rio Lot, Francia.

Lugar	Concentración de metales en mg/Kg			
	Cd	Zn	Cu	Pb
Cajarc	294	10000	264	1280
Templo	180	7230	78	593
Marcenac	1.4	206	42	68

Autores: Audry, S.; Schäfer, J.; Blanc, G.; Jouanneau, J. Técnica Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS).

En la costa de Karachi- Pakistán, zona de mayor concentración industrial a lo largo de la costa, se determinó el contenido de metales pesados en sedimentos. Para este estudio se tomaron muestras en tres lugares diferentes⁵⁶. Las concentraciones de metales en los tres sitios se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentraciones de los metales pesados en los sedimentos de la Costa Karachi, Pakistán

Lugar	Concentración de metales en mg/Kg								
	Cu	Ni	Zn	Mg	Fe	Cr	Pb	Co	Cd
Bujeli	0,002	0,003	0,029	1,01	0,928	0,008	0,014	0,047	0,001
Punto Paraíso	0,003	0,003	0,006	2,98	1,79	0,004	0,015	0,01	0,005
Nathia Gali	0,003	0,003	0,015	0,938	1,33	0,002	0,008	0,006	0,000

Autores: Qari, R.; Siddiqui, S. A.; Qureshi, N. A. Técnica AAS.

En el río Piscina en Italia se evaluó la concentración de los metales pesados en sedimentos, este cuerpo de agua ha sido afectado por las actividades mineras que se realizaban en la zona, los sedimentos fueron recogidos en tres afluentes del río Piscina. Tabla 5. I4 río Irvi, R4 Río Rola Cani y P5 punto río Piscina⁵⁷.

Tabla 5. Concentraciones de los metales pesados en los sedimentos del río Piscina, Italia.

Lugar	Concentración de metales en mg/Kg							
	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
I4	18	9	53	71800	348	14	1300	4100
R4	130	19	490	76800	2900	28	12400	20800
P5	57	38	210	76800	3100	28	3100	11800

Autores: Concas, A.; Arda, C.; Cristini, A.; Zuddas, P.; Cao, G. técnica ICP-MS.

El río Tisza en Hungría fue afectado por dos accidentes mineros a principios del año 2000. Para determinar la concentración de metales pesados se usó fluorescencia total de rayos X por reflexión total (TXRF), para análisis de metales en aguas. Fluorescencia de rayos X, para metales en sedimentos y microanálisis para determinación de la composición a nivel de una sola partícula⁵⁸.

En la costa del mar Rojo en los puertos sudaneses, las fuentes de contaminación de este sitio se deben a los vertimientos procedentes de la refinería de petróleo, la industria y los residuos domésticos. Para la determinación de Ni, Cu, Zn y Pb en sedimentos se usó espectrofotometría de absorción atómica las concentraciones mg/L fueron: 0,76, 0,82, 0,89 y 0,70 respectivamente. Así mismo, el método de normalización granulométrica (GN), es empleado para la separación de las partículas de sedimentos sobre la base de tamaño de grano⁵⁹.

Otro método de procedimiento, es el de extracción secuencial propuesto por Tessier et al, Kersten y Forstner. Este procedimiento brinda información de movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de los metales que la simple medición de las concentraciones disueltas⁶⁰.

En el noroeste de Bangladesh región donde ha existido la minería, se evaluó la presencia de metales pesados. Las concentraciones de metales se resumen en la Tabla 6. Para el caso del Arsénico fue empleado el generador de hidruros⁶¹.

Tabla 6. Concentraciones de metales pesados en sedimentos en Bangladesh.

Metales	Concentración mg/L	Metales	Concentración mg/L
S	2,792	Fe	0,038
K	0,05	Co	0,072
Ca	0,03	Ni	0,029
Ti	0,13	Cu	0,027
V	0,092	Zn	0,026
Cr	0,072	As	0,028
Mn	0,048	Br	0,035
Sr	0,056	Pb	0,01

Autores: Bhuiyan, M. A. H.; Islam, M. A.; Dampare, S. B.; Parvez, L.; Suzuki, S. técnica AAS.

En Colombia en la región Pacífica en la Bahía de Buenaventura, se encontró concentraciones de Cd de 2,1 a 5,1 µg/g, pasando los valores permitidos de la norma para sedimentos de bahías y costas. También se ha encontrado en esta misma región Hg y Pb con concentraciones de 0,15 a 3,5 µg/g para el primero y de 2,1 a 52,3 µg/g para el segundo ²⁵.

En el caso de los municipios de Vetás y California se ha estudiado mercurio en sedimentos en el río Suratá monitoreado por la CDMB. Debido a que no se conoce información documentada acerca del contenido de metales pesados en sedimentos de estos dos municipios mineros, se hizo necesaria la realización de este estudio con el fin de conocer las concentraciones de estos metales en el entorno.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 VERIFICACIÓN DE EQUIPO DE TRABAJO

Los análisis de los metales de Cobre, Cromo, Plomo y Zinc en sedimentos se realizaron en el laboratorio de ciencias básicas de la facultad de Química Ambiental de la Universidad Santo Tomás- Floridablanca. Para este procedimiento se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica marca Thermo Solar Ice 3000 acoplado al equipo Vapor Kit modelo VP100. (Figura 2). Para el caso de Hg se realizó en los laboratorios de SIAMA LTDA, ya que el equipo de la universidad para determinar este metal no estaba en funcionamiento.

El equipo de absorción atómica, fue calibrado de acuerdo con el programa SOOLAR, (manual operativo) donde se establece la concentración de chequeo con su respectiva absorbancia requerida para cada metal (Anexo A).

Figura 2. Equipo de absorción atómica acoplado al generador de hidruros.



Fuente: Autoras

5.2 METODOLOGÍA ANALÍTICA UTILIZADA

Para la determinación de los metales pesados en los sedimentos se utilizó los protocolos del IDEAM y Estándar métodos. Se compararon con la Directrices de calidad de sedimentos canadienses para la protección de la vida acuática.

5.2.1 Muestreo. El día 19 de marzo de 2016 se realizó la toma de muestras de los sedimentos en los Ríos Vetas y Suratá y en la Quebrada La Baja. La vía de

acceso a estos lugares no está pavimentada, la distancia entre Vetas y California es 14km. La temperatura de Vetas oscila entre 6-17 °C ⁶² y California entre 13-20°C⁶³, mientras Suratá presenta un clima de 18°C ⁶⁴. Estos lugares están formados por cabeceras municipales, rurales y presentan diversidad en vegetación.

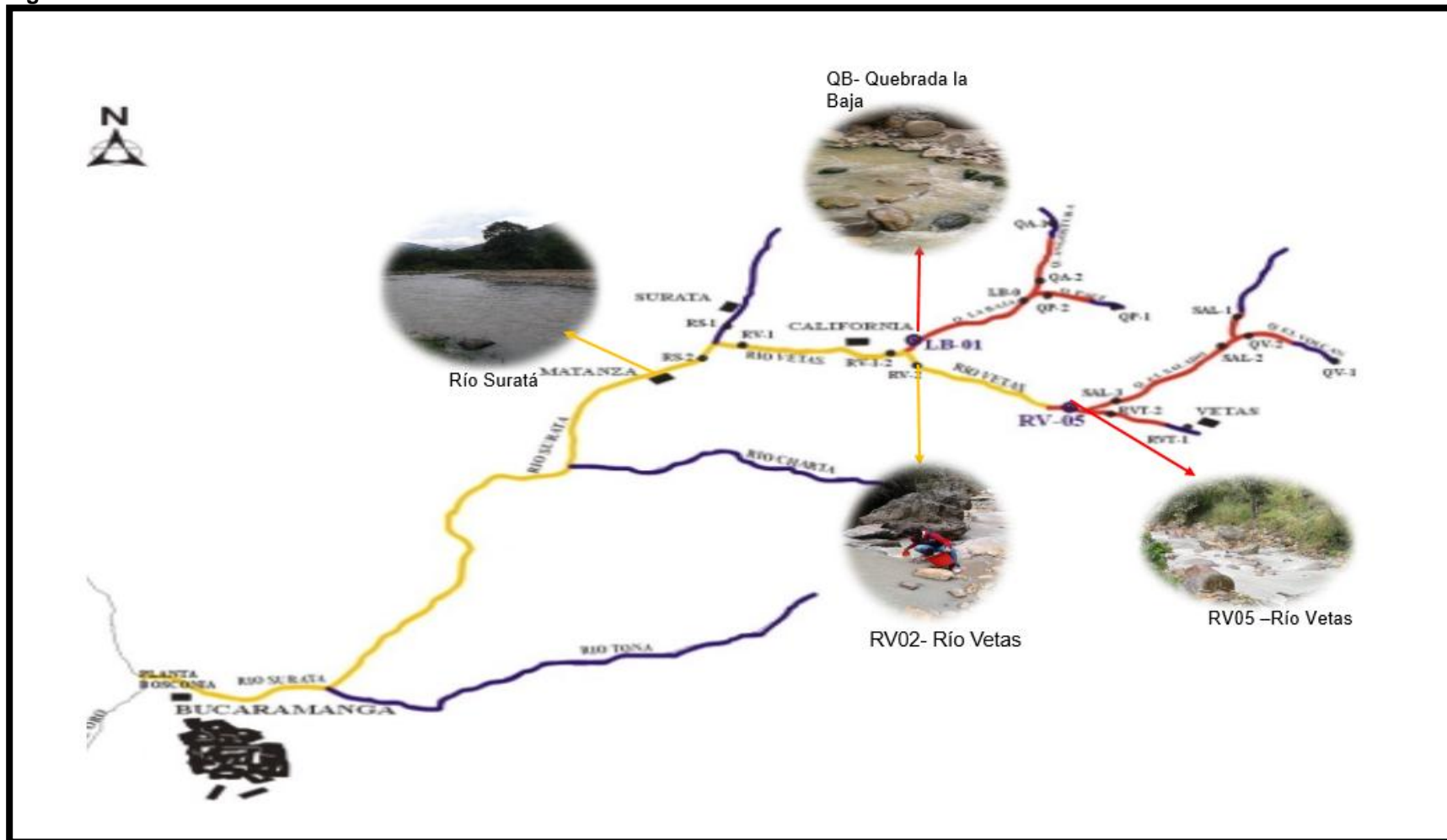
Para llevar a cabo la selección de los puntos de muestreo se tuvieron presentes los estudios realizados por la autoridad ambiental CDMB, caracterizados por ser los lugares de mayor acumulación de sedimentos, la toma de las muestras fue en temporada de verano, el caudal de los afluentes era bajo. Los puntos de referencia de acuerdo con el mapa (Figura 3) son:

Punto 1: Este punto de muestreo se tomó antes de la confluencia con la Quebrada La Baja, los puntos tomados fueron río Vetas (RV05) y (RV02) punto de monitoreo de la CDMB. En ambos puntos los sedimentos eran finos-delgados, el color del sedimento de RV05, era de color Gris-verdoso, el de RV02, era de color Café claro. El agua presentaba un color grisáceo.

Punto 2: Este punto de muestreo se tomó antes de la confluencia del Río Vetas, punto de monitoreo de la CDMB denominado Quebrada La Baja (QB). La muestra recolectada tenía una textura delgada y presentaba un color marrón claro. El agua presentaba un color café claro y había presencia de lava en algunas orillas y piedras de la quebrada

Punto 3: Este punto de muestreo se tomó en el Río Suratá antes de la planta de tratamiento de Bosconia ubicada al norte de Bucaramanga, punto de monitoreo de la CDMB denominado La Playa. La textura de la muestras de los sedimentos era semi gruesa de color marrón oscuro.

Figura 3: Localización de área de estudio.



Fuente: Wolff Carreño Erwin Proyecto río Surata: Líneas de Acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería Aurífera en Vetas y California. Fotos tomadas por las autoras.

5.2.2 Recolección de las muestras. Para la toma de las muestras en los diferentes lugares de estudio se definieron seis puntos de muestreo a lo largo y ancho del caudal con una profundidad determinada en cada uno de los lugares de referencia. La muestra fue recolectada en un recipiente plástico de 5L, previamente purgado con el mismo afluente, luego se mezcló el sedimento para homogenizar y tomar una muestra representativa, después fueron guardadas en bolsa de polietileno de 2Kg previamente tratada en el laboratorio, etiquetadas y almacenadas en una nevera de icopor a temperatura ambiente y transportada al laboratorio de ciencias básicas de la universidad Santo Tomás (Figura 4).

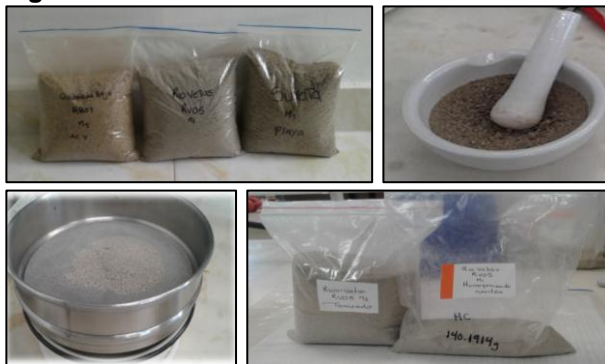
Figura 4. Toma de Muestra.



Fuente: Autoras

5.2.3 Tratamiento de las muestras. Las muestras de sedimento se colocaron a secar durante ocho días a temperatura ambiente, una vez seca la muestra, se macero para romper los grumos más grandes. Después, se realizó un tamizaje sobre una malla de 60 micras con el propósito de separar la fracción gruesa de la fracción fina, luego se homogenizo la muestra y por último se realizó el cuarteo con el fin de obtener una muestra representativa para los respectivos análisis; las muestras fueron guardadas en una cava de icopor a temperatura ambiente. (Figura 5)

Figura 5. Tratamiento de la muestra.



Fuente: Autoras

5.2.4 Determinación de los metales en sedimentos. Para la digestión de los metales de Cu, Pb, Zn y Cr en los sedimentos se utilizó la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales; el procedimiento consistió en pesar una cantidad específica de muestra seca y adicionar 25 mL de HCl al 1M y agitar durante 1 hora. Después se dejó en reposo por 24 horas y una vez cumplido este tiempo, la muestra se filtró con papel cuantitativo y se aforo en un balón de 50mL con agua desionizada.

Para la digestión de Hg en los sedimentos se utilizó la metodología propuesta por Métodos estándar para el análisis de aguas y aguas residuales (3112B), el procedimiento consistió en pesar 0,25g de la muestra seca y adicionar 5mL de H₂SO₄, 2,5mL de HNO₃ y 15mL de solución de KMnO₄ se dejó en reposo durante 15 minutos en baño maría a 95°C, una vez se cumplió el tiempo se dejó reposar; después se le adiciono 8mL de la solución de persulfato de potasio, se tapó y se colocó nuevamente a baño maría a 95°C. Se observa durante 2 horas la permanencia del color violeta del permanganato en la solución, después de las dos horas se retiró del baño maría y se dejó en reposo el digerido; luego se le adiciono 5mL de Hidrocloruro de Hidroxilamina-cloruro de sodio para eliminar el exceso de permanganato en la solución, se filtró y antes de pasar las muestras al equipo se le adiciono Hidroxilamina.

Una vez realizada las digestiones se determinó la concentración de los metales de Cu, Cr, Pb y Zn en la matriz por la técnica de absorción atómica con llama y Hg por la técnica de vapor frío. Por último se compararon los resultados con la Norma Directrices de calidad de sedimentos canadienses para la protección de la vida acuática. Este procedimiento se realizó para cada uno de los puntos de muestreo por triplicado para Cu, Pb, Zn y Cr. Obteniendo 9 datos por metal. Para el caso de mercurio se realizó una sola vez para obtener 3 datos.

5.2.5 Desarrollo de la estandarización. Se siguió el procedimiento de metodologías analíticas de los estándar métodos y el Protocolo para estandarización de métodos analíticos del IDEAM.

5.2.5.1 Determinación del rango lineal. Para determinar el rango lineal se prepararon y analizaron estándares que cubrieran el rango establecido para cada metal. Los estándares fueron aforados con agua acidificada con NHO₃ al 1,5%. Los reactivos utilizados para cada metal fue marca Merck. (Anexo B)

5.2.5.2 Determinación del límite de detección (LDM). Para la estimación límite de detección se analizaron 10 blancos en la curva seleccionada para cada método y se calculó el promedio y la desviación estándar de los mismos (Anexo C). Para la determinación LDM se aplicó la siguiente ecuación:

Ecuación 2: Determinación LDM

$$LDM = t_{n-1} * S$$

Dónde: **T** =Valores de la distribución t (99%) para calcular LDM (Ver anexo D)

5.2.5.3 Límite de cuantificación del método (LC). Para el límite de cuantificación del método, se preparó estándares de concentraciones cercanas o iguales al límite de detección calculado (Anexo E). Se realizó la lectura 10 veces, presentó una exactitud y un coeficiente de variación < 10%.

5.2.5.4 Rango de aplicación. Con los resultados de los análisis se calculó el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el porcentaje de error. Para el Rechazo de datos se calculó el T estadístico para los valores extremos de cada grupo (máximo y mínimo). Se calculó el límite de detección y se analizó la exactitud y la precisión de los dos estándares para determinar el límite de cuantificación.

Se estableció como concentración máxima de interés el valor de cada metal que corresponde a la concentración más alta del rango operacional definido por el equipo. Muestras con concentraciones mayores debieron ser analizadas con dilución previa.

Una vez hallada la linealidad de la curva de calibración para los diferentes metales, se determinó el rango de aplicación. (Anexo F)

5.2.5.5 Sensibilidad.

Ecuación 3: Sensibilidad

$$m = \frac{\sum X_i Y_i - (\sum X_i \sum Y_i / n)}{\sum X_i^2 - ((\sum X_i^2) / n)}$$

Dónde:m, es la pendiente de la curva de calibración.

5.2.5.6 Precisión. Se calculó la desviación estándar (S), el promedio (X) y la precisión en términos de coeficiente de variación (CV) para cada muestra tomando todos los triplicados de los análisis de cada metal (9 datos).

Ecuación 4: Desviación estándar

$$CV = \frac{S * 100}{X}$$

La precisión expresada como coeficiente de variación aceptado en el laboratorio es <10%.

Cálculo para Exactitud

$$\%Error = \left(\frac{X_{exp} - X_{real}}{X_{real}} \right) * 100$$

Los resultados no deben exceder el 10% del valor verdadero.

5.2.5.7 Rechazo de datos. Se halló el T estadístico para los valores que pasaron el valor de confianza en cada una de las diferentes muestras, se debe tener presente el valor (máximo y mínimo), de la siguiente manera:

Ecuación 5: Cálculo de Rechazo

$$T = (x_{alto} - X_{prom})/S \text{ Para un valor alto}$$

$$T = (x_{prom} - X_{bajo})/S \text{ Para un valor bajo}$$

Dónde: X_{alto} = es valor más alto de los datos

X_{bajo} = es el valor menor de los datos

X_{prom} = es el promedio de los datos

S = es la desviación estándar

Si el T calculado es mayor que el valor de T 95% para rechazo de datos, el dato se rechaza (Anexo G). Nota: Se pueden rechazar como máximo dos datos; si la aplicación del criterio de rechazo da positiva para más de dos datos, el ensayo deberá repetirse.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

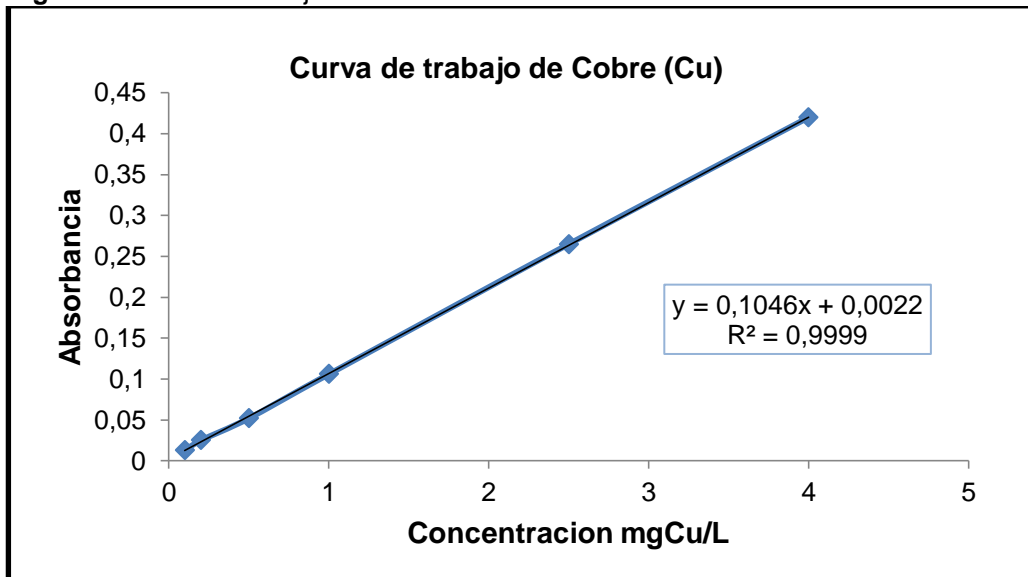
Inicialmente se calibró el equipo con las condiciones de chequeo establecidas por su manual operacional y la literatura para cada uno de los metales estudiados. Para cada metal se seleccionaron las 3 curvas de mejor coeficiente de correlación ($\geq 0,9995$) (Anexo I M Q U E Y), se realizó una curva promedio.

6.1 METODO DE COBRE.

6.1.1 Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación. La sensibilidad corresponde al valor de la pendiente obtenida en la curva de calibración del método. El valor para Cu fue 0.1046.

El rango operacional de concentraciones en el cual es aplicable el método para la determinación de Cu en sedimentos, está entre el límite de cuantificación de 0,1 y 4,0 mg/L (Figura 6). Las muestras de concentraciones superiores pueden ser analizadas realizando diluciones. En este caso las muestras de Cu, para el punto QB fueron diluidas.

Figura 6. Curva de trabajo de Cobre.



Fuente: Autoras

6.1.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación. Para encontrar el límite de detección y de cuantificación se realizó de acuerdo con los

criterios y ecuaciones descritas en la sesión 5.3.3 metodología analítica, el promedio fue de 0,0038 desviación estándar calculada fue de 0,0063 de una serie de 10 blancos (Anexo C).

Para la determinación de límite de detección, Se realizó el siguiente cálculo para:

$$LDM = t_{n-1} * S$$
$$LD \text{ mgCu/L} = 2,82 * 0,0063 = 0,02 \text{ mg/L}$$

De acuerdo con el límite calculado, se realizaron lecturas de estándares de 0,1 y 0,2mg/L (Anexo E), donde el estándar de concentración de 0,1 presentó un coeficiente de variación de 7,6 y un porcentaje de error de 7,07%, y el de 0,2 presenta un coeficiente de variación de 5,9 y un porcentaje de error de 5,4%. De acuerdo con los resultados el estándar de 0,1 y 0,2 presenta mediciones con exactitud y precisión aceptables para la determinación de Cu (menores al 10%).

6.1.3 Resultado de Cu en muestras de sedimentos. La determinación de la concentración de Cu en los sedimentos en RV02, RV05, QB y RSp, se realizó en el laboratorio de investigación de la Universidad Santo Tomás, empleando la técnica de absorción atómica por llama. Las muestras de sedimentos tomadas en los diferentes puntos de muestreo se realizaron por triplicado (Anexo J).

La precisión se expresa como coeficiente de variación, para cada uno de estos puntos de muestreo se obtuvieron 9 datos, la precisión para RV02, RV05, QB y RSp fue de 6,76 - 7,39 - 4,66 y 6,05% respectivamente, son valores aceptables ya que son <10%.

El valor máximo encontrado en mg/Kg de Cu para cada RV02, RV05, QB y RSp fue de 6,96 - 12,59 - 152,37 y 6,71 el valor mínimo fue de 5,65 -10,50 -133,91 y 5,41 respectivamente. No fue necesario rechazar ningún dato, ya que los valores de T bajo y T alto no sobrepasaron el valor de T 95% para rechazo de datos.

En la tabla 7 se encuentran las concentraciones de Cu presentes en las muestras de sedimentos, los resultados están dados en las unidades de mg/Kg.

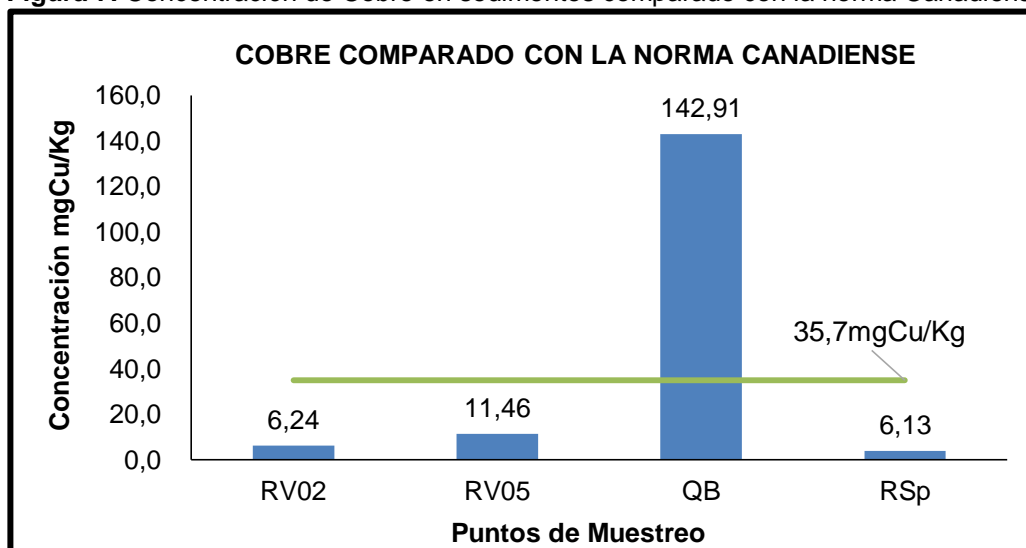
Tabla 7. Concentración de mgCu/Kg en los sedimentos.

Resultados obtenidos para Cobre (mgCu/Kg)					
Fecha	Día	RV-02	RV-05	QB	La Playa
18/07/2016	1	5,85	10,50	133,91	6,03
		6,22	11,07	148,01	5,41
		5,65	10,88	151,103	6,42
09/08/2016	2	5,95	12,50	152,37	6,34
		6,15	12,31	142,69	6,71
		6,53	10,58	138,36	5,95
13/09/2016	3	6,11	12,59	144,90	6,11
		6,69	10,89	135,59	6,31
		6,96	11,84	139,29	5,92
	Promedio	6,24	11,46	142,91	6,13
	Desviación estándar	0,42	0,85	6,66	0,37
	CV %	6,76	7,39	4,66	6,05
	Número de datos	9,00	9,00	9,00	9,00
	Valor mínimo	5,65	10,50	133,91	5,41
	Valor máximo	6,96	12,59	152,37	6,71
	T bajo	1,39	1,14	1,35	1,95
	T alto	1,73	1,33	1,42	1,55
	T 95% rechazo de datos	2,11	2,11	2,11	2,11

Fuente: Autoras

Los niveles de cobre encontrados en los sedimentos recolectados en río Vetas (RV02- RV05), quebrada La Baja (QB) y río Suratá (Rsp)(Figura 7)

Figura 7. Concentración de Cobre en sedimentos comparado con la norma Canadiense.



Fuente: Autoras

Los resultados muestran que la concentración de sedimento más alta de Cu fue de 142,91mg/Kg para la quebrada La Baja (QB). De acuerdo con la legislación de Canadá el límite máximo permitido para Cu en sedimentos es de 35,7mg/Kg, por lo que la quebrada La Baja no cumple con este parámetro.

La quebrada La Baja se encuentra ubicada en el municipio de California, este lugar se caracteriza por tener mayor aporte de minerales de Cu (calcopirita, calcosina, covelina entre otras)⁴, lo que indica que en este sitio ha existido minería y con la extracción de oro hay mayor remoción de este metal. En el río Vetas (RV05 y RV02) según las características del lugar hay presencia de cuprita (traza) que se encuentra asociados a la pirita II⁶⁵.

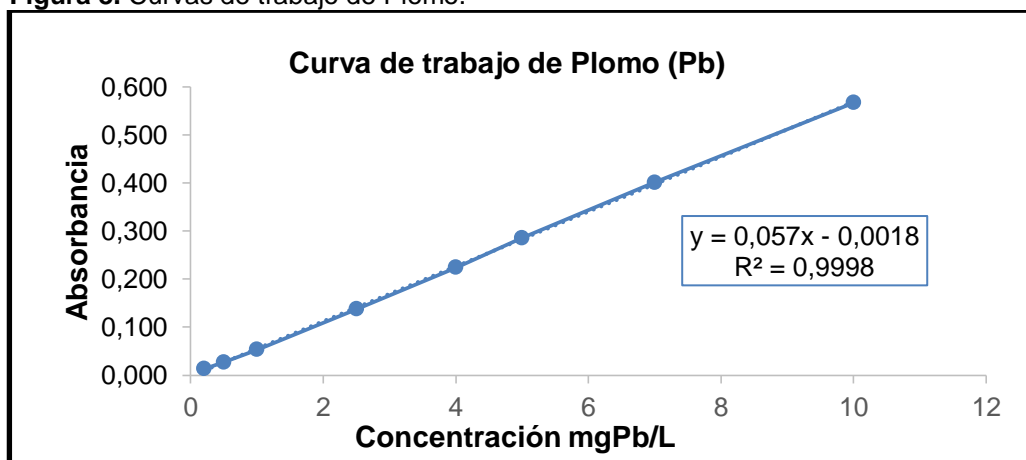
La concentración de Cu en mg/ kg en sedimentos para RV02, RV05, RSp fue de 6,24 - 11,46 y 6,13 respectivamente. Estos puntos no sobrepasan el valor máximo admisible por la legislación de Canadá para sedimentos. El punto de muestreo río Suratá la playita (RSp) es un punto distanciado de la actividad minera. En este punto se encontró la menor concentración de Cu en los sedimentos.

6.2 METODO DE PLOMO.

6.2.1 Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación. La sensibilidad corresponde al valor de la pendiente obtenida en la curva de calibración del método de Pb. Su valor fue de 0,057.

El rango operacional de concentraciones en el cual es aplicable el método para la determinación de Pb en sedimentos, está entre el límite de cuantificación de 0,2 y 10 mg/L (Figura 8). Las muestras de concentraciones superiores pueden ser analizadas realizando diluciones.

Figura 8. Curvas de trabajo de Plomo.



Fuente: Autoras

6.2.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación. Para hallar el límite de detección y de cuantificación se utilizaron los criterios y ecuaciones descritas en la sesión 5.3.3 metodología analítica. El promedio fue de 0,0262, la desviación estándar calculada fue de 0,0136 de una serie de 10 blancos (Anexo C). Para la determinación de límite de detección se realizó el siguiente cálculo:

$$LDM = t_{n-1} * S$$
$$LD \text{ mgPb/L} = 2,82 * 0,0136 = 0,038$$

De acuerdo con el límite calculado, se realizaron lecturas de estándares de 0,1 y 0,2mg/L (Anexo E), donde el estándar de concentración de 0,1 presentó un coeficiente de variación de 15,5 y un porcentaje de error de 30%, y el de 0,2 presenta un coeficiente de variación de 6,9 y un porcentaje de error de 2,26%. De acuerdo con los resultados el estándar de 0,2 presenta valores con exactitud y precisión aceptables para la determinación de Pb (menores al 10%).

6.2.3 Resultado de Pb en muestras de sedimentos. La determinación de la concentración de plomo en los sedimentos en RV02, RV05, QB y RSp, se realizó en el laboratorio de investigación de la Universidad Santo Tomás, empleando la técnica de absorción atómica en llama. Las muestras de sedimentos tomadas en los diferentes puntos de muestreo se realizaron por triplicado (Anexo N).

La precisión se expresa como coeficiente de variación, para cada uno de estos puntos de muestreo se obtuvieron 9 datos, la precisión para RV02, RV05, QB y RSp fue de 6,19 - 2,73 - 7,33 y 8,0% respectivamente, son valores aceptables ya que son <10%.

El valor máximo encontrado en mg/Kg de Pb para cada RV02, RV05, QB y RSp fue de 19.91 - 81.54 - 14.02 y 10.88 el valor mínimo fue de 17,03 -75.76 -11,11 y 8,30 respectivamente. No fue necesario rechazar ningún dato, ya que los valores de T bajo y T alto no sobrepasaron el valor de T 95% para rechazo de datos.

En la tabla 8, se encuentran las concentraciones de Pb presentes en las muestras de sedimentos, los resultados están dados en las unidades de mg/Kg.

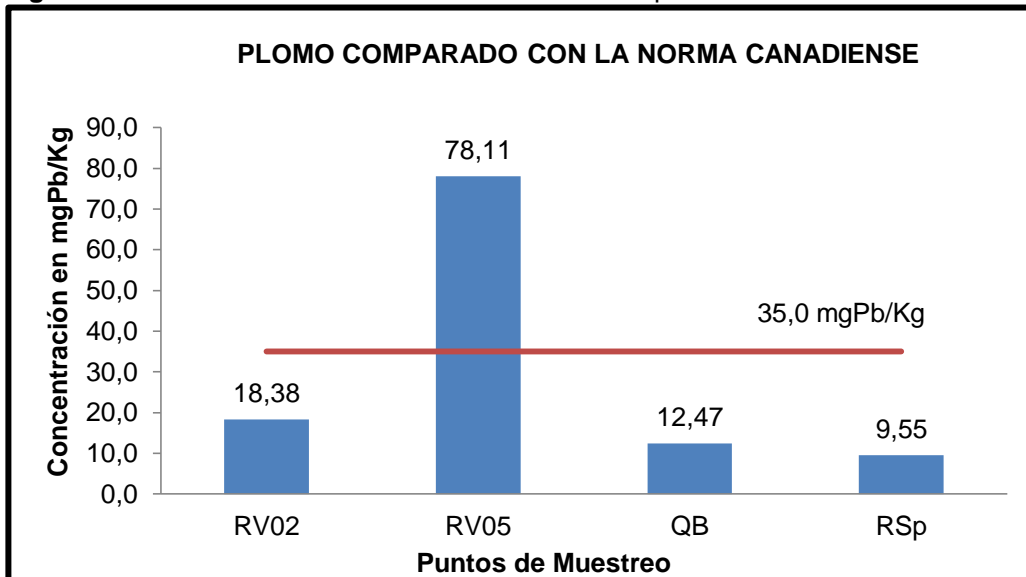
Tabla 8. Concentración de mgPb/Kg en los sedimentos.

Resultados obtenidos para Plomo (mgPb/Kg)					
Fecha	Día	RV-02	RV-05	QB	La Playa
21/07/2016	1	19,50	75,76	13,20	9,00
		17,74	76,78	12,51	9,36
		17,03	75,85	11,11	10,06
11/08/2016	2	19,91	81,54	13,21	9,00
		17,80	79,09	11,82	9,70
		17,13	77,18	12,16	8,30
15/09/2016	3	19,91	81,18	12,61	10,88
		18,55	78,46	14,02	10,18
		17,86	77,13	11,57	9,48
	Promedio	18,38	78,11	12,47	9,55
	Desviación estándar	1,14	2,14	0,91	0,76
	CV %	6,19	2,73	7,33	8,00
	Número de datos	9,00	9,00	9,00	9,00
	Valor mínimo	17,03	75,76	11,11	8,30
	Valor máximo	19,91	81,54	14,02	10,88
	T bajo	1,19	1,10	1,49	1,64
	T alto	1,34	1,61	1,70	1,74
	T 95% rechazo de datos	2,11	2,11	2,11	2,11

Fuente: Autoras

Los niveles de Plomo encontrados en los sedimentos recolectados en río Vetas (RV02- RV05), quebrada La Baja y río Suratá se encuentran en la Figura 9

Figura 9: Concentración de Plomo en sedimentos comparado con la norma Canadiense.



Fuente: Autoras

Los resultados muestran que la concentración de sedimento más alta de Pb fue de 78,11mg/Kg para río Vetas (RV05). De acuerdo con la legislación de Canadá el límite máximo permitido para Pb en sedimentos es de 35mg/Kg, el punto RV05 no cumple con este parámetro.

De acuerdo con el estudio petroquímico de las rocas ígneas realizado en los municipios de Vetas-California, se encontró presencia de plomo. En estudios geológicos realizados en Vetas se ha encontrado galena (PbS), asociado al Au.⁶⁶

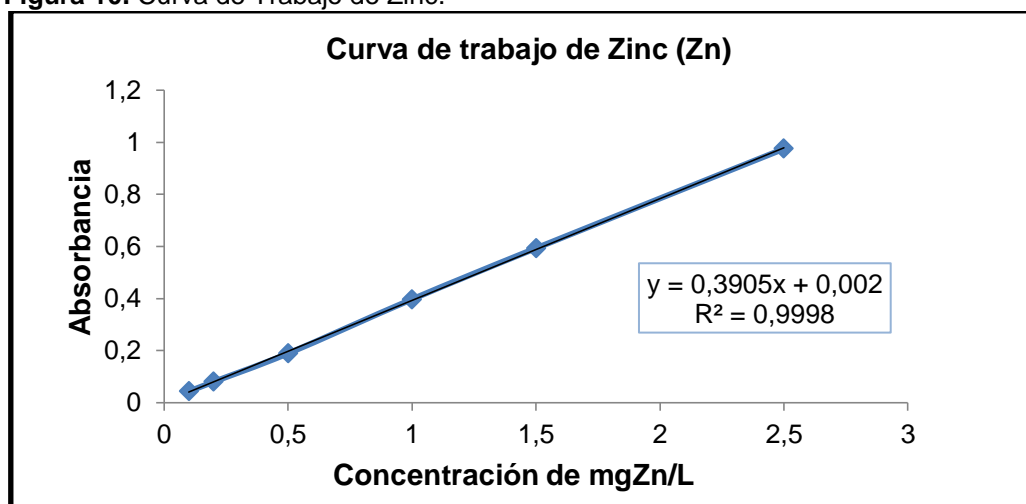
La concentración de Pb en mg/ kg en sedimentos para RV02, QB, RSp fue 18,38 12,47 y 9,55 respectivamente. Estos puntos no sobrepasan el valor máximo permitido por la legislación de Canadá para sedimentos.

6.3 METODO DE ZINC.

6.3.1 Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación. La sensibilidad corresponde al valor de la pendiente obtenida en la curva de calibración del método de zinc cuyo valor fue de 0,3905

El rango operacional de concentraciones en el cual es aplicable el método para la determinación de Zn en sedimentos, está entre el límite de cuantificación de 0,1 y 2,5 mg/L (Figura 10). Las muestras de concentraciones superiores pueden ser analizadas realizando diluciones. En este caso las muestras de Zn, para el punto QB fueron diluidas

Figura 10. Curva de Trabajo de Zinc.



Fuente: Autoras

6.3.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación. Para hallar el límite de detección y de cuantificación se utilizó los criterios y ecuaciones descritas en la sesión 5.3.3 metodología analítica. El promedio fue de 0,0033, la desviación estándar calculada fue de 0,0025 de una serie de 10 blancos (Anexo C). Para la determinación de límite de detección, Se realizó el siguiente cálculo:

$$LDM = t_{n-1} * S$$

$$LD \text{ mgZn/L} = 2,82 * 0,0025 = 0,007$$

De acuerdo con el límite calculado, se realizaron lecturas de estándares de 0,1 y 0,2mg/L (Anexo D), donde el estándar de concentración de 0,1 presentó un coeficiente de variación de 5,6 y un porcentaje de error de 7,62%, y el de 0,2 presenta un coeficiente de variación de 2,9 y un porcentaje de error de 8,0%. De acuerdo con los resultados el estándar de 0,1 presenta mediciones con exactitud y precisión aceptables para la determinación de Zn (menores al 10%).

6.3.3 Resultado de Zn en muestras de sedimentos. La determinación de la concentración de zinc en los sedimentos en RV02, RV05, QB y RSp, se realizó en el laboratorio de investigación de la Universidad Santo Tomás, empleando la técnica de absorción atómica. Las muestras de sedimentos tomadas en los diferentes puntos de muestreo se realizaron por triplicado. (Anexo R). En la tabla 9, se encuentran las concentraciones de Zn presentes en las muestras de sedimentos, los resultados están dados en las unidades de mg/Kg.

Tabla 9. Concentración de mgZn/Kg en los sedimentos.

Resultados obtenidos para Zinc (mgZn/Kg)					
Fecha	Día	RV-02	RV-05	QB	La Playa
22/07/2016	1	16,76	26,61	236,52	16,56
		16,33	26,38	232,94	15,92
		16,44	26,70	240,59	15,64
12/08/2016	2	20,04	27,47	252,37	18,47
		17,62	26,77	237,32	16,79
		16,99	26,90	241,42	16,16
16/09/2016	3	18,13	27,59	243,51	16,99
		17,67	29,49	253,49	18,84
		19,08	29,70	255,42	17,30
	Promedio	17,67	27,51	243,73	16,96
	Desviación estándar	1,24	1,25	8,15	1,09
	CV %	7,04	4,53	3,34	6,45
	Número de datos	9,00	9,00	9,00	9,00
	Valor mínimo	16,33	26,38	232,94	15,64
	Valor máximo	20,04	29,70	255,42	18,84
	T bajo	1,08	0,91	1,32	1,21
	T alto	1,90	1,76	1,43	1,72
	T 95% rechazo de datos	2,11	2,11	2,11	2,11

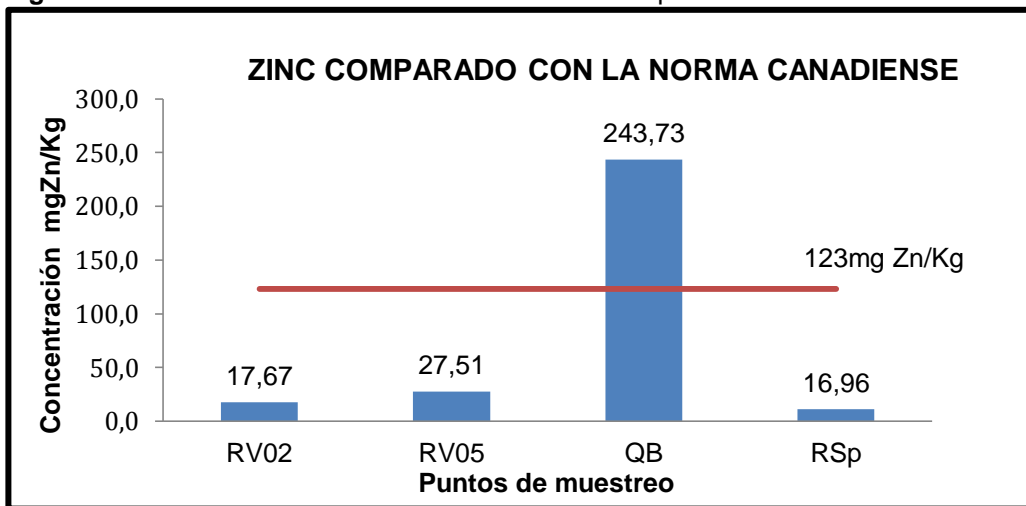
Fuente: Autoras

La precisión se expresa como coeficiente de variación, para RV02, RV05, QB y RSp fue de 7,04 - 4,53 – 3,34 y 6,45% respectivamente, son valores aceptables ya que son <10%.

El valor máximo encontrado en mg/Kg de Zn para RV02, RV05, QB y RSp fue de 20,04 - 29,70 255,42 y 18,84 el valor mínimo fue de 16,33 - 26,38 - 232,94 y 15,64 respectivamente. No fue necesario rechazar ningún dato, ya que los valores de T bajo y T alto no sobrepasaron el valor de T 95% para rechazo de datos.

Los niveles de cobre encontrados en los sedimentos recolectados en río Vetas (RV02- RV05), quebrada La Baja y río Suratá se encuentran en la Figura 11

Figura 11. . Concentración de Zinc en sedimentos comparado con la norma Canadiense.



Fuente: Autoras

Los resultados muestran que la concentración de sedimento más alta de Zn fue de 243,67 mg/Kg para QB. De acuerdo con la legislación de Canadá el límite máximo permitido para Zn en sedimentos es de 123 mg/Kg, por lo tanto la quebrada La Baja no cumple con este parámetro.

La concentración de Zn en mg/Kg en sedimentos para RV02, RV05 y RSp fue 17,67- 27,51 y 11,25. Estos niveles no sobrepasan el valor máximo admisible por la legislación de Canadá para sedimentos.

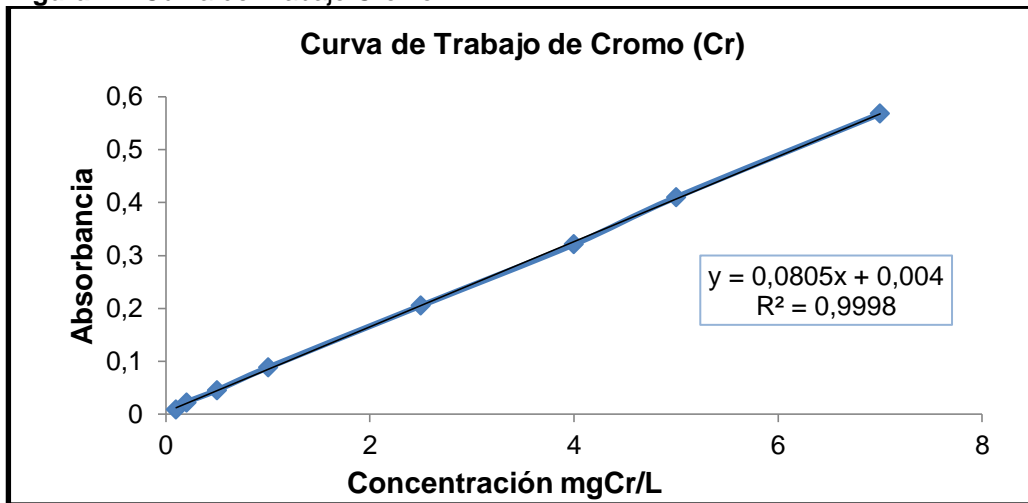
En el municipio de California el oro que se extrae es fino, se realiza la amalgamación y cianuración para extracción de oro cuyo proceso consiste en adicionar virutas de Zinc para la precipitación del Au, lo que explica la mayor concentración de zinc en QB.

6.4 METODO DE CROMO.

6.4.1 Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación. La sensibilidad corresponde al valor de la pendiente obtenida en la curva de calibración del método de Cr. Su valor fue de 0,0805

El rango operacional de concentraciones de Cr en el cual es aplicable el método está entre el límite de cuantificación de 0,1 y 7,0 mg/L (Figura 12). Las muestras de concentraciones superiores pueden ser analizadas realizando diluciones.

Figura 12. Curva de Trabajo Cromo.



Fuente: Autoras

6.4.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación. Para encontrar el límite de detección y de cuantificación se utilizó los criterios y ecuaciones descritas en la sesión 5.3.3 metodología analítica. El promedio fue de 0,0567 desviación estándar calculada fue de 0,0010 de una serie de 10 blancos (Anexo C).

Para la determinación del límite de detección, Se realizó el siguiente cálculo:

$$LDM = t_{n-1} * S$$
$$LD \text{ mgCr/L} = 2,82 * 0,001 = 0,003$$

De acuerdo con el límite calculado, se realizaron lecturas de estándar de 0,1mg/L donde el estándar de concentración de 0,1 presentó un coeficiente de variación de 3,7 y un porcentaje de error de 8,3%, De acuerdo con los resultados el estándar de 0,1 presenta mediciones con exactitud y precisión aceptables para la determinación de Cr (menores al 10%). Los resultados estadísticos se encuentran en el (Anexo E).

6.4.3 Resultado de Cr en muestras de sedimentos. La determinación de la concentración de cromo en los sedimentos en RV02, RV05, QB y RSp, se realizó en el laboratorio de investigación de la Universidad Santo Tomás, empleando la técnica de absorción atómica. Las muestras de sedimentos tomadas en los diferentes puntos de muestreo se analizaron por triplicado. (Anexo V).

La precisión se expresa como coeficiente de variación, para RV02, RV05, QB y RSp fue de 9,00– 9,75 -9,61 y 9,43 % respectivamente. Son valores aceptables ya que son <10%. Según la norma

En el punto RSp se realizó el rechazo de un dato ya que los valores de T bajo y T alto sobrepasaron el valor de T 95% para rechazo de datos. El valor máximo encontrado en mg/Kg de Cr para RV02, RV05, QB y RSp fue de 2,89 – 3,38 – 3,93 y 2,07 el valor mínimo fue de 2,19 - 2,55 - 3,08 y 1,56 respectivamente.

En la tabla 10 se encuentran las concentraciones de Cr presentes en las muestras de sedimentos, los resultados están dados en las unidades de mg/Kg

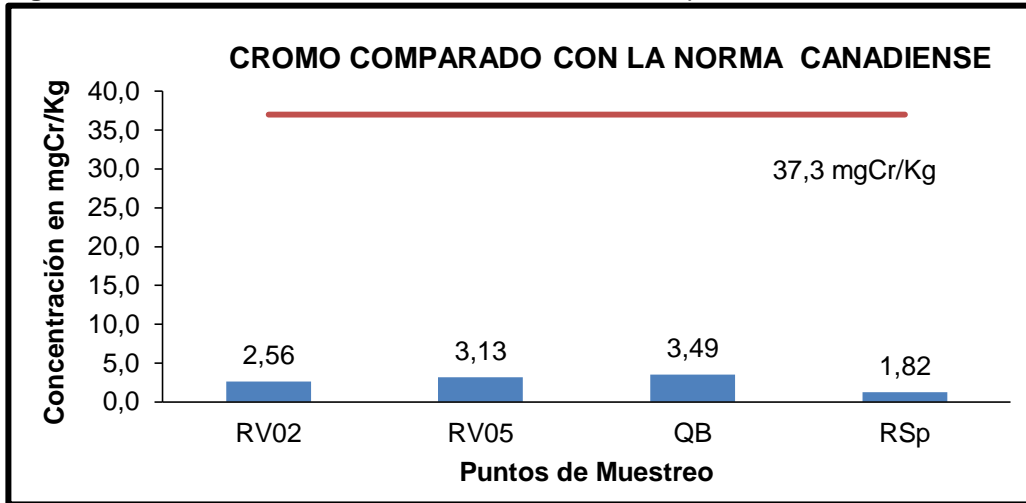
Tabla 10. Concentración de mgCr/Kg en los sedimentos.

Resultados obtenidos para Cromo (mgCr/Kg)					
Fecha	Día	RV-02	RV-05	QB	La Playa
26/07/2016	1	2,69	3,27	3,93	1,94
		2,19	2,55	3,44	1,92
		2,57	2,67	3,19	1,69
18/08/2016	2	2,32	3,33	3,08	1,56
		2,83	3,31	3,33	1,82
		2,58	3,30	3,84	2,07
21/09/2016	3	2,89	3,38	3,13	1,89
		2,63	3,25	3,88	1,64
		2,38	3,12	3,63	
	Promedio	2,56	3,13	3,49	1,82
	Desviación estándar	0,23	0,31	0,34	0,17
	CV %	9,00	9,75	9,61	9,43
	Número de datos	9,00	9,00	9,00	8,00
	Valor mínimo	2,19	2,55	3,08	1,56
	Valor máximo	2,89	3,38	3,93	2,07
	T bajo	1,62	1,90	1,23	1,48
	T alto	1,40	0,82	1,30	1,46
	T 95% rechazo de datos	2,11	2,11	2,11	2,11

Fuente: Autoras

Los niveles de cromo encontrados en los sedimentos recolectados en el río Vetas (RV02- RV05), quebrada La Baja y río Suratá se encuentran en la Figura 13.

Figura 13. . Concentración de Cromo en sedimentos comparado con la norma Canadiense.



Fuente: Autoras

Los resultados hallados indican que la concentración más alta de Cr con 3,49 mg/Kg se encontró en el punto de QB.

La concentración de Cr en mg/Kg en sedimentos para RV02, RV05 y RSp fue 2,56, 3,13 y 1,82. Estos puntos no sobrepasan el valor máximo admisible por la legislación de Canadá para sedimentos.

La presencia de Cr en esta zona de estudio se debe a los procesos naturales como la lixiviación de minerales por efectos de lluvias entre otros⁶⁷. En los municipios de Vetas-California los minerales que más se encuentran son la piritita, calcopiritita, molibdenita, galena, oro y plata. Lo que indica que el Cr, no es de origen minero⁶⁸.

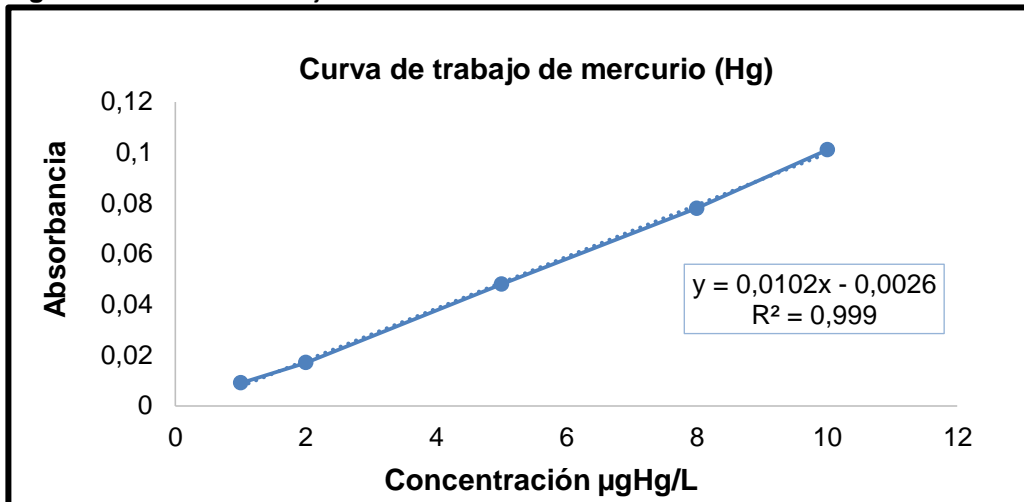
6.5 METODO DE MERCURIO.

6.5.1.Linealidad, sensibilidad y rango de aplicación. Los resultados de Hg y la curva de trabajo fueron suministrados por el laboratorio SIAMA LTDA. La sensibilidad corresponde al valor de la pendiente obtenida en la curva de calibración del método de Hg y fue de 0,0102. (Figura 14).

El rango operacional de concentraciones en el cual es aplicable el método para la determinación de Hg en sedimentos, está entre el límite de cuantificación de 1,0 y 10 µg/L, de la curva de calibración. Las muestras de concentraciones superiores

pueden ser analizadas realizando diluciones. En el caso de mercurio las muestras fueron diluidas así; para los puntos de RV05, Rv02 y RSp se diluyó la muestra 5 veces, mientras que para QB la muestra se diluyó 10 veces.

Figura 14. Curva de trabajo de Mercurio.



Fuente: SIAMA LTDA

6.5.2 Determinación del límite de detección y de cuantificación. El límite de detección para Hg fue de $0,05\mu\text{g/L}$ valor suministrado por el laboratorio SIAMA.

6.5.3 Resultado de Hg en muestras de sedimentos. La determinación de la concentración de Hg en los sedimentos en RV02, RV05, QB y RSp, se realizó en el laboratorio de investigación SIAMA, empleando la técnica de absorción atómica (Vapor frío).

A cada uno de estos puntos se le realizó un triplicado, los resultados se hallaron de acuerdo con la curva de trabajo. La conversión de $\mu\text{gHg/L}$ a mgHg/Kg se encuentra en el anexo Z.

La precisión se expresa como coeficiente de variación, para RV02, RV05, QB y RSp fue de 1,03 – 1,68- 1,23 y 3,52 % respectivamente. Los puntos RV02, RV05, QB y RSp son valores aceptables ya que son $<10\%$.

En la tabla 11 se encuentran las concentraciones de Hg presentes en las muestras de sedimentos, los resultados están dados en las unidades de mg/Kg .

Tabla 11. Concentración de mgHg/Kg en los sedimentos.

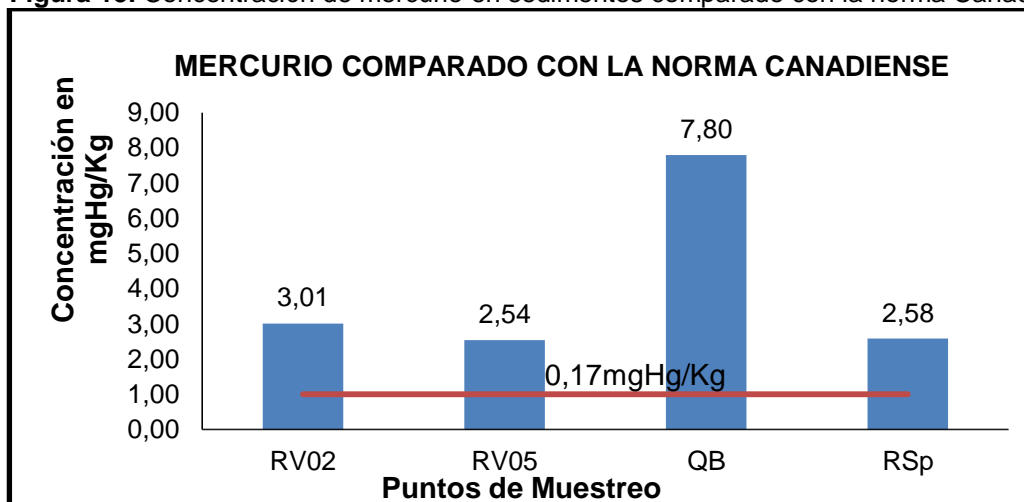
Resultados obtenidos para Mercurio (mgHg/Kg)					
Fecha	Día	RV-02	RV-05	QB	La Playa
23/09/2016	1	3,01	2,52	7,78	2,63
		3,05	2,58	7,90	2,47
		2,99	2,50	7,71	2,63
	Promedio	3,01	2,54	7,80	2,58
	Desviación estándar	0,03	0,04	0,10	0,09
	CV %	1,03	1,68	1,23	3,52
	Número de datos	3,00	3,00	3,00	3,00
	Valor mínimo	2,99	2,50	7,71	2,47
	Valor máximo	3,05	2,58	7,90	2,63
	T bajo	0,95	0,76	0,90	1,15
	T alto	1,04	1,13	1,08	0,61
	T 95% rechazo de datos	2,11	2,11	2,11	2,11

Fuente: SIAMA (proporción de concentración de mgHg/Kg), autoras (parámetros estadísticos).

Las concentraciones halladas para RV02, RV05, QB y RSp fueron de 3,01 – 2,54 – 7,80 y 2,58 el valor mínimo fue de 2,99 - 2,50 - 7,71 y 2,47 respectivamente.

Los niveles de Hg encontrados en los sedimentos recolectados en río Vetas (RV02- RV05), quebrada La Baja y río Suratá se encuentran en la Figura 15.

Figura 15. Concentración de mercurio en sedimentos comparado con la norma Canadiense.



Fuente: Autoras.

Los niveles de mercurio encontrados en las muestras de sedimentos para RV02, RV05, QB y RSp fueron de 3,01 – 2,54 -7,80 y 2,58 mg/Kg respectivamente, siendo QB la de mayor contenido de Hg. Todos los valores sobrepasan el valor máximo

admitido por la legislación canadiense. Si estos sedimentos son removidos, el Hg podría pasar a la columna de agua generando una contaminación secundaria, ocasionando un riesgo para la vida acuática y los habitantes que consumen líquido y peces de estas fuentes hídricas.

La presencia de Hg en los sedimentos de los puntos muestreados se debe al uso constante de este metal para la extracción de oro en el proceso de amalgamación.

La concentración de sedimento del río Suratá fue de 2,58mg/Kg, esta fuente hídrica es usada en gran parte para el abastecimiento de agua potable para el municipio de Bucaramanga. Aunque las concentraciones de los sedimentos sobrepasan el valor máximo admitido por la legislación Canadiense, el último reporte (2015) del Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) dice el Hg encontrado en las aguas del Suratá es de $< 0,60\mu\text{g/L}$, cumpliendo con la resolución 2115 de 2007 ⁶⁹

CONCLUSIONES

Se evidenció un problema ambiental debido al elevado contenido de metales pesados en los sedimentos de los diferentes puntos de muestreo.

En el punto de muestreo de la quebrada la Baja se encontraron niveles de contaminación por Cu y Zn de 142,91 y 243,73 mg/Kg, sobrepasando los valores admisibles por la norma canadiense.

En el punto de muestreo del río Vetas RV05 se encontraron niveles de contaminación por Pb de 78,11 mg/Kg.

Todas las concentraciones obtenidas de Hg en sedimentos analizados, sobrepasaron el nivel máximo admitido por la Norma canadiense cuyo valor es de 0,17mgHg/Kg. Los niveles de RV02, RV05, QB y RSp fueron de 3,01 - 2,54 - 7,80 y 2,58 mgHg/Kg.

La presencia de metales pesados en el punto de muestreo RSp del Río Suratá, es consecuencia de los vertimientos de sólidos y líquidos que se hacen a sus afluentes Quebrada la Baja y Rio Vetas, por la extracción y beneficio del oro en los municipios de Vetas y California.

RECOMENDACIONES

Sería muy valioso complementar el análisis de metales pesados en el sedimento con el análisis de metales pesados en la columna de agua en diferentes épocas del año, para determinar su removilización y biodisponibilidad.

Debido a que Colombia no cuenta con normativa ambiental para sedimentos se recurrió a la Norma Internacional Canadiense “Directrices de calidad de sedimentos canadienses para la protección de la vida acuática” Sería importante que Colombia tuviera su propia legislación para sedimentos para futuros trabajos de investigación.

Las universidades deben apoyar este tipo de investigaciones ambientales porque aportan información de la contaminación del ambiente y compete a la salud pública.

BIBLIOGRAFÍA

1. Rosas Rodríguez Hermógenes Contaminación de sedimentos del Rio Anoia por metales pesados (España-Barcelona). **2005**, 5, 79-89.
2. Nobi, E. P.; Dilipan, E.; Thangaradjou, T.; Sivakumar, K.; Kannan, L. Geochemical and geo-statistical assessment of heavy metal concentration in the sediments of different coastal ecosystems of Andaman Islands, India. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2010**, 87, 253-264.
3. Aguilar, V. R. A. Declaratoria del Parque Natural Regional Santurban. <http://lasillavacia.com/sites/default/files/mineropedia/cartarichardaguilarsanturban.pdf> (accessed 07/25, 2014).
4. Acota Jaimes Cielo Guia Minero Ambiental para el Beneficio del Oro en el Distrito Minero Vetas-California , Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.
5. Geominas, Ed.; In *Unidad de Planeación Minero energético UPME*; Departamento Santander, Distrito minero Vetas-california; 2006; , pp 53-58.
6. Tang, W.; Zhao, Y.; Wang, C.; Shan, B.; Cui, J. Heavy metal contamination of overlying waters and bed sediments of Haihe Basin in China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2013**, 98, 317-323.
7. Wolff, G. I.; Assis, L. R. I.; Pereira, G. C. I.; Carvalho, J. G. I.; Castro, E. M. V. Efeitos da toxicidade do zinco em folhas de *Salvinia auriculata* cultivadas em solução nutritiva. **2009**, 27, 133-137.
8. Municipio de Vetas PLAN DE DESARROLLO 2012-2015 “UNIDOS POR VETAS LOGRAREMOS EL CAMBIO” . http://vetas-santander.gov.co/apc-aa-files/33623964383462643630623566616664/plan_de_desarrollo_2012_2015.pdf (accessed 19/12/2014, 2012).
9. Departamento Santander, municipio de California Por California la unidad. http://www.california-santander.gov.co/apc-aa-files/64383037613831343764623933326633/pd-california-unidad_2012-2015.pdf (01/03/2015).
10. Eróstegui Revilla Carlos Pedro Contaminación por metales pesados. **2012**, 12.

11. Helwege, A. Challenges with resolving mining conflicts in Latin America. *The Extractive Industries and Society* **2015**, 2, 73-84.
12. Walter, M.; Urkidi, L. Community mining consultations in Latin America (2002–2012): The contested emergence of a hybrid institution for participation. *Geoforum*.
13. Ministerio de Minas Colombia Minera. http://www.simco.gov.co/Portals/0/archivos/Cartilla_Mineria.pdf (accessed 4/15, 2015).
14. Ponce Muriel Álvaro Panorama del sector minero. <http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=SW5htFa4evE=> (accessed 4/15, 2015).
15. Rodado Noriega Carlos Sector minero en colombiano. **2010**.
16. Uniminera, Ed.; In *Programa de aprovechamiento sostenible de minerales - PASM en el departamento Santander*; Información de los aspectos geológicos, mineros, ambientales, económicos, sociales y políticos del departamento Santander; 2009; pp 288.
17. Defensoria del pueblo, Ed.; In *Minería de Hecho Colombia*; Casos particulares de los distritos mineros; Imprenta Nacional de Colombia: colombia, 2010; , pp 217.
18. Bissig, T.; Mantilla Figueroa, L. C.; Hart, C. J. R. Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (–Mo, Au) metallogeny. *Lithos* **2014**, 200–201, 355-367.
19. Acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A.E.S.P Fuentes de Agua. <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=33> (accessed 5/08, 2015).
20. Wolff Carreño Erwin Incorporación de tecnologías limpias para beneficiar los minerales auríferos de la pequeña minería de Vetas- California (Santander), buscando reducir Vertimiento de cianuro y mercurio. [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/C23C00D7BA2CA2FF05257BF90076A3F3/\\$FILE/articulo_mineria.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/C23C00D7BA2CA2FF05257BF90076A3F3/$FILE/articulo_mineria.pdf) (accessed 08/25, 2016).
21. Delgado Méndez A Jesús, Ortiz Peña A Jaime Estudio del proceso de Neutralización del cianuro presente en los residuos del proceso de lixiviación de minerales Auríferos en el distrito minero de Vetas-california, UIS, Bucaramanga, 2009.

22. PNUMA Sinopsis Nacional de la Minería Aurífera Artesanal y pequeña Escala. http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf (accessed 08/08/, 2016).
23. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME Producción más limpia en la minería de oro de Colombia Mercurio, Cianuro y otras sustancias. http://www.upme.gov.co/Docs/Mineria_limpia.pdf (accessed 9/12, 2016).
24. Corporación Autónoma Regional Cauca Contaminación por Mercurio y otros distritos minero Buenos Aires Cauca. <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA%20BUENOS%20AIRES/EVALUACION%20Minero%20ambiental%20BUENOS%20AIRES.pdf> (accessed 09/14, 2016).
25. Marrugo Negrette Jose Luis Evaluación por contaminación de metales pesados en la bahía Ciénaga la Soledad y bahía de Cispatá, Cuenca del Bajo Sinú, Departamento de Córdoba Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Química, Montería, Julio 2011.
26. Hashim, M. A.; Mukhopadhyay, S.; Sahu, J. N.; Sengupta, B. Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *J. Environ. Manage.* **2011**, *92*, 2355-2388.
27. Granada Grisales Natalia; Escobar López Daniel Felipe. Análisis y cuantificación de metales pesados (Pb, Cd, Ni, y Hg) en agua, sedimentos y bioacumulación en la especie *Rhandia Wagne* (Barbudo) del río Cauca en el municipio de la Virginia, Universidad Tecnológica de Pereira. Escuela de Tecnología Química, 2012.
28. Rojas Mayorquín Citlalli Micaela Estudios de la contaminación de los recursos hídricos en la cuenca del Río San Pedro, previos a la construcción de una hidroeléctrica (P.H. Las Cruces) en Nayarit, México, Universidad de Guadalajara, Mexico, 2011.
29. Yi, Y.; Yang, Z.; Zhang, S. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environmental Pollution* **2011**, *159*, 2575-2585.
30. Medina González Roger, Zetina Moguel Carlos, Comas Bolio Manuel, Pat Canu Roberto Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en sedimentos y en tres especies de pepino del mar (clase holothuroidea) de las costas del estado de Yucatan Mexico. **2004**, *2*, 1-19.

31. Comonfort Ignacio Determinacion de los metales pesados (As, Cd, Hg y Pb) presentes en el rio Hondo, Quintana Roo. **2007**.
32. Jiménez Verdesoto David Bolívar Cuantificación de metales pesados (Cadmio, Cromo, Níquel y Plomo) en agua superficial, sedimentos y organismos (*Crassostrea columbiensis*) Ostion de Mangle en el puente Portete del estero salado Guayaquil, Universidad de Guayaquil. Escuela de Biología, 2012.
33. Agencias para las Sustancias Toxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) Cobre. http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts132.html#bookmark9 (accessed 11/20, 2014).
34. Corporación Nacional del Cobre, Chile CODELCO Cobre y Medio Ambiente. http://www.codelco.com/el-cobre-y-el-medio-ambiente/prontus_codelco/2011-02-17/155005.html (accessed 07/09, 2015).
35. Agencias para las Sustancias Toxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) Cobre. . . http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts132.html#bookmark9 (accessed 04/16, 2016).
36. Lilli, M. A.; Moraetis, D.; Nikolaidis, N. P.; Karatzas, G. P.; Kalogerakis, N. Characterization and mobility of geogenic chromium in soils and river bed sediments of Asopos basin. *J. Hazard. Mater.* **2015**, *281*, 12-19.
37. Jagtap, R.; Maher, W. Measurement of mercury species in sediments and soils by HPLC–ICPMS. *Microchemical Journal* **2015**, *121*, 65-98.
38. Chakraborty, P.; Mason, R. P.; Jayachandran, S.; Vudamala, K.; Armoury, K.; Sarkar, A.; Chakraborty, S.; Bardhan, P.; Naik, R. Effects of bottom water oxygen concentrations on mercury distribution and speciation in sediments below the oxygen minimum zone of the Arabian Sea. *Mar. Chem.* **2016**, *186*, 24-32.
39. Gao, B.; Han, L.; Hao, H.; Zhou, H. Pollution characteristics of mercury (Hg) in surface sediments of major basins, China. *Ecol. Ind.* **2016**, *67*, 577-585.
40. Márquez Aristide, William Senior, Martínez Gregorio, Castañeda Julián, González Ángel Concentraciones de metales en sedimentos y tejidos musculares de algunos peces de la Laguna de Castillero, Venezuela. . 2008, 2.
41. Birch, G. F.; Taylor, S. E.; Matthai, C. Small-scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metals in aquatic sediments: a review and some new concepts. *Environmental Pollution* **2001**, *113*, 357-372.

42. Resúmenes de Salud Pública Cinc (Zn). http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.html (accessed 02/16, 2015).
43. Zn (Znc y Compuestos). <http://www.prtr-es.es/Zn-Zinc-y-compuestos,15611,11,2007.html> (accessed 04/26, 2015).
44. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Diagnóstico Nacional de salud Ambiental. **2012**.
45. Quispe Coquí Violeta, Pérez Foguet Agustí Desarrollo de un análisis integral para monitoreos ambientales en cuencas Andinas, Universidad Politécnica de Catalunya. Facultad de ingeniería Ambiental, 2015.
46. Vinodh, R.; Padmavathi, R.; Sangeetha, D. Separation of heavy metals from water samples using anion exchange polymers by adsorption process. *Desalination* **2011**, *267*, 267-276.
47. Islam, M. S.; Ahmed, M. K.; Raknuzzaman, M.; Habibullah -Al- Mamun, M.; Islam, M. K. Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecol. Ind.* **2015**, *48*, 282-291.
48. Filgueiras, A. V.; Lavilla, I.; Bendicho, C. Development of fast thermal programs in electrothermal atomic absorption spectrometry using hot injection and removal of the ashing stage for determination of heavy metals in sequential extracts from sediments. *Anal. Chim. Acta* **2004**, *508*, 217-223.
49. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Resolución N° 0066 protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos o desechos peligrosos en el país. **2009**.
50. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Determinación de metales en sedimentos por espectrofotometría atómica llama directa, espectrofotometría atómica horno de grafito y emisión por plasma. **2009**.
51. Anonymous Espectrofotometría de emisión y absorción atómica. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8252/4/T7Abasorc.pdf> (accessed 3/26, 2015).
52. Facultad de Ciencias Químicas Espectrofotometría de emisión y Absorción Atómica. (accessed 5/05, 2015).

53. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Determinación de mercurio total en aguas y sedimentos por espectrofotometría atómica vapor frío y emisión por plasma. **2009**.
54. Canadian Sediment Quality Guidelines for the protection of Aquatic Life .
55. Audry, S.; Schäfer, J.; Blanc, G.; Jouanneau, J. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France). *Environmental Pollution* **2004**, 132, 413-426.
56. Qari, R.; Siddiqui, S. A.; Qureshi, N. A. A comparative study of heavy metal concentrations in surficial sediments from coastal areas of Karachi, Pakistan. *Mar. Pollut. Bull.* **2005**, 50, 595-599.
57. Concas, A.; Ardau, C.; Cristini, A.; Zuddas, P.; Cao, G. Mobility of heavy metals from tailings to stream waters in a mining activity contaminated site. *Chemosphere* **2006**, 63, 244-253.
58. Osán, J.; Török, S.; Alföldy, B.; Alsecz, A.; Falkenberg, G.; Baik, S. Y.; Van Grieken, R. Comparison of sediment pollution in the rivers of the Hungarian Upper Tisza Region using non-destructive analytical techniques. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **2007**, 62, 123-136.
59. Idris, A. M. Combining multivariate analysis and geochemical approaches for assessing heavy metal level in sediments from Sudanese harbors along the Red Sea coast. *Microchemical Journal* **2008**, 90, 159-163.
60. Hang, X.; Wang, H.; Zhou, J.; Du, C.; Chen, X. Characteristics and accumulation of heavy metals in sediments originated from an electroplating plant. *J. Hazard. Mater.* **2009**, 163, 922-930.
61. Bhuiyan, M. A. H.; Islam, M. A.; Dampare, S. B.; Parvez, L.; Suzuki, S. Evaluation of hazardous metal pollution in irrigation and drinking water systems in the vicinity of a coal mine area of northwestern Bangladesh. *J. Hazard. Mater.* **2010**, 179, 1065-1077.
62. Alcaldía de Vetás-Santander Nuestro Municipio. http://www.vetas-santander.gov.co/informacion_general.shtml (accessed 08/15, 2015).
63. Alcaldía de California-Santander http://www.california-santander.gov.co/informacion_general.shtml (accessed 08/15, 2015).
64. Alcandía de Suratá -Santander Nuestro Municipio. http://www.surata-santander.gov.co/informacion_general.shtml (accessed 08/15, 2015).

65. Contreras Gustavo German Contextualización Geológica de la brecha Hidrotermal Auroargentífera de la mina la Baja (Distrito Minero de California Vetas -Santander), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.
66. García Ramírez C, A.; Uribe Portilla, E. Caracterización Geológica y Mineralógica del yacimiento de Tosca (Vetas-Santander, Colombia), implicaciones para el procesamiento del mineral de las menas Auroargentíferas. **2006**, 28.
67. Ecología El Cromo como tóxico ambiental y riesgo para la salud. <http://www.ecologiahoy.com/el-cromo-como-toxico-ambiental> (accessed 17/09/2016, 2016).
68. Ministerio de Minas, U. Estudio de la Cadena de Mercurio en Colombia con énfasis en la actividad minera de oro. <https://rds.org.co/es/recursos/estudio-de-la-cadena-del-mercurio-en-colombia-con-efasis-en-la-actividad-minera-de-oro-tomo-ii> (accessed 17/08/2016, 2016).
69. Ministerio de medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial Resolución 2115. 22/07/2007 **2007**, 2-23.

ANEXOS

Anexo A. Condiciones de lectura para metales del equipo AAS.

Elementos	Longitud de onda(nm)	Concentración mg/L	Absorbancia requerida	Tipo de llama
Cu	324.8	3.5	0.4	Aire – acetileno
Pb	217.0	7.0		
Zn	213.9	1.0		
Cr	357.9	5.0		

Fuente: Equipo de Absorción Atómica- Software SOLAAR.

Anexo B Concentraciones para curvas de calibración según el rango lineal.

Metal	Rango lineal mg/L	Concentraciones mg/L
Cu	0,1 - 4,0	0,1 0,5 1,0 2,5 4,0
Pb	0,2 - 10,0	0,2 0,5 1,0 2,5 4,0 5,0 7,0 10,0
Zn	0,2-2,5	0,2 0,25 0,5 1,0 1,5-2,5
Cr	0,2- 7,0	0,2 0,5 1,0 2,5 4,0 5,0 7,0
Hg	1,0-10 µg/L	1,0 2,0 5,0 8,0 10,0 µg/L

Fuente: Autoras

Anexo C. Absorbancias de blancos: determinación límite de detección.

Blanco	Absorbancia Cu mg/L	Absorbancia Pb mg/L	Absorbancia Zn mg/L	Absorbancia Cr mg/L
1	0,096	0,0314	0,0054	-0,064
2	0,000	0,0140	0,0028	-0,065
3	0,096	0,0489	0,0003	-0,067
4	0,000	0,0314	0,0054	-0,065
5	0,096	0,0140	0,0028	-0,065
6	0,096	0,0140	0,0003	-0,066
7	0,096	0,0140	0,0028	-0,065
8	0,000	0,0489	0,0003	-0,065
9	0,096	0,0140	0,0079	-0,066
10	0,000	0,0314	0,0054	-0,067
Promedio	0,0576	0,0262	0,0033	-0,0655
Desviación estándar	0,0496	0,0144	0,0026	0,0010
LDM=(tn-1)*S	0,1398	0,0405	0,0074	0,0027

Fuente: Autoras

Anexo D: Valores de la distribución t (99%) para calcular LD.

Grados de libertad	99%	Grados de libertad	99%
1	31,82	20	2,53
2	6,96	21	2,52
3	4,54	22	2,51
4	3,75	23	2,50
5	3,36	24	2,49
6	3,14	25	2,48
7	3,00	26	2,48
8	2,90	27	2,47
9	2,82	28	2,47
10	2,76	29	2,46
11	2,72	30	2,46
12	2,68	40	2,42
13	2,65	50	2,40
14	2,62	60	2,39
15	2,60	70	2,38
16	2,58	80	2,37
17	2,57	90	2,37
18	2,55	100	2,36
19	2,54		

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales. Estandarización de Métodos Analíticos

Anexo E. Concentración conocida: determinación límite de cuantificación.

Ensayos	Absorbancia Cu	0,1 mg/L Cu	Absorbancia Cu	0,2 mg/L Cu	Absorbancia Pb	0,1 mg/L Pb	Absorbancia Pb	0,2 mg/L Pb
1	0,011	0,086	0,023	0,201	0,005	0,108	0,011	0,213
2	0,012	0,096	0,022	0,191	0,006	0,126	0,010	0,195
3	0,011	0,086	0,021	0,182	0,007	0,144	0,009	0,178
4	0,013	0,105	0,023	0,201	0,008	0,161	0,010	0,195
5	0,010	0,076	0,020	0,172	0,006	0,126	0,009	0,178
6	0,012	0,096	0,023	0,201	0,008	0,161	0,010	0,195
7	0,014	0,115	0,022	0,191	0,005	0,109	0,011	0,213
8	0,011	0,086	0,021	0,182	0,006	0,126	0,009	0,178
9	0,013	0,105	0,023	0,201	0,007	0,144	0,010	0,213
10	0,010	0,076	0,020	0,172	0,005	0,109	0,011	0,195
Promedio		0,093		0,189		0,131		0,195
Desviación estándar		0,013		0,012		0,020		0,014
Coef. de variación %		13,99		6,24		15,45		7,32
% Error		7,30		5,30				2,35
T bajo		1,29		1,47		1,15		1,21
T alto		1,72		0,98		1,46		1,24
T 95% rechazo datos		2,18		2,18		2,18		2,18

Fuente: Autoras

Anexo F. (Continuación) Concentración conocida: determinación límite de cuantificación.

Ensayos	Absorbancia Zn	0,1 mg/L Zn	Absorbancia Zn	0,2 mg/L Zn	Absorbancia Cr	0,2 mg/L Cr
1	0,040	0,100	0,085	0,215	0,025	0,244
2	0,042	0,105	0,083	0,210	0,024	0,232
3	0,043	0,108	0,084	0,212	0,025	0,244
4	0,042	0,105	0,088	0,223	0,023	0,219
5	0,039	0,097	0,086	0,218	0,024	0,232
6	0,043	0,108	0,082	0,207	0,023	0,257
7	0,046	0,115	0,088	0,223	0,024	0,232
8	0,043	0,108	0,082	0,207	0,025	0,244
9	0,045	0,113	0,087	0,220	0,023	0,219
10	0,047	0,118	0,089	0,225	0,025	0,244
Promedio		0,108		0,216		0,237
Desviación estándar		0,006		0,007		0,012
Coef. de variación %		6,00		3,14		5,11
% Error		7,70		8,00		18,35
T bajo		1,66		1,33		1,46
T alto		1,59		1,33		1,68
T 95% rechazo datos		2,18		2,18		2,18

Fuente: Autoras

Anexo G. Volúmenes de acuerdo al rango de concentración.

Elemento	Rango lineal mg/L	Volumen mL
Cu	0,1 -4,0	100
Pb	0,2-10	
Zn	0,1-1,5	
Cr	0,1-7,0	25
Hg	1.0-10	20

Fuente: Autoras

Anexo H. Valores t para el 95% de rechazo de Datos

N	95%	N	95%	N	95%	N	95%
3	1,15	11	2,24	19	2,53	27	2,69
4	1,46	12	2,29	20	2,56	28	2,71
5	1,67	13	2,33	21	2,58	29	2,72
6	1,82	14	2,37	22	2,60	30	2,74
7	1,94	15	2,41	23	2,62	31	2,87
8	2,03	16	2,44	24	2,64	32	2,96
9	2,11	17	2,47	25	2,66	33	3,03
10	2,18	18	2,50	26	2,67	34	3,21

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales. Estandarización de Métodos Analíticos

Anexo I. Curva de calibración de cobre.

Concentración mgCu/L	Absorbancia	Absorbancia	Absorbancia
0,1	0,014	0,011	0,012
0,2	0,027	0,026	0,025
0,5	0,050	0,053	0,052
1,0	0,107	0,104	0,106
2,5	0,260	0,258	0,265
4,0	0,416	0,418	0,420
R ²	0,9997	0,9998	0,9999

Fuente: Autoras

Anexo J. Concentración Cobre en sedimentos por triplicado día 18/07/2016

Nombre	Código	mgCu/L	mgCu/Kg	Promedio mgCu/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,293	5,85	5,90
	RV02 M2	0,312	6,22	
	RV02 M3	0,283	5,65	
	RV05 M1	0,525	10,50	10,82
	RV05 M2	0,554	11,07	
	RV05 M3	0,545	10,88	
Quebrada La Baja	QB M1	0,671	133,91	144,63
	QB M2	0,622	148,01	
	QB M3	0,651	151,98	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,302	6,03	5,95
	RSp M2	0,273	5,41	
	RSp M3	0,322	6,42	

Fuente: Autoras

Anexo K. (Continuación) Concentración de cobre en sedimentos por triplicado día 09/08/2016

Nombre	Código	mgCu/L	mgCu/Kg	Promedio mgCu/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,298	5,953	6,21
	RV02 M2	0,308	6,145	
	RV02 M3	0,327	6,532	
	RV05 M1	0,627	12,501	11,80
	RV05 M2	0,617	12,311	
	RV05 M3	0,530	10,580	
Quebrada La Baja	QB M1	0,762	152,369	144,47
	QB M2	0,714	142,690	
	QB M3	0,694	138,358	
Rio Suratá (Playa)	RSp M1	0,317	6,342	6,33
	RSp M2	0,337	6,710	
	RSp M3	0,298	5,951	

Fuente: Autoras

Anexo L. (Continuación) Concentración de cobre en sedimentos por triplicado día 13/09/2016

Nombre	Código	mgCu/L	mgCu/Kg	Promedio mgCu/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,306	6,112	6,59
	RV02 M2	0,335	6,689	
	RV02 M3	0,354	6,964	
	RV05 M1	0,631	12,587	11,77
	RV05 M2	0,545	10,886	
	RV05 M3	0,593	11,844	
Quebrada La Baja	QB M1	0,727	144,898	139,92
	QB M2	0,679	135,593	
	QB M3	0,698	139,290	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,306	6,113	6,114
	RSp M2	0,315	6,306	
	RSp M3	0,296	5,922	

Fuente: Autoras

Anexo M. Curva de calibración de Plomo.

Concentración mgPb/L	Absorbancia	Absorbancia	Absorbancia
0,2	0,015	0,012	0,013
0,5	0,025	0,028	0,027
1,0	0,051	0,055	0,053
2,5	0,134	0,138	0,140
4,0	0,226	0,218	0,228
5,0	0,285	0,284	0,287
7,0	0,402	0,398	0,403
10,0	0,567	0,564	0,569
R ²	0,9996	0,9997	0,9998

Fuente: Autoras

Anexo N. Concentración de plomo en los sedimentos por triplicado día 21/07/2016

Nombre	Código	mgPb/L	mgPb/Kg	Promedio mgPb/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,976	19,50	18,08
	RV02 M2	0,888	17,74	
	RV02 M3	0,853	17,03	
	RV05 M1	3,790	75,76	76,13
	RV05 M2	3,843	76,78	
	RV05 M3	3,808	75,85	
Quebrada La Baja	QB M1	0,661	13,20	12,27
	QB M2	0,626	12,51	
	QB M3	0,556	11,11	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,451	9,00	9,47
	RSp M2	0,469	9,36	
	RSp M3	0,503	10,06	

Fuente: Autoras

Anexo O. (Continuación) Concentración de plomo en los sedimentos por triplicado día 11/08/2016

Nombre	Código	mgPb/L	mgPb/Kg	Promedio mgPb/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,998	19,908	18,28
	RV02 M2	0,892	17,798	
	RV02 M3	0,857	17,131	
	RV05 M1	4,090	81,538	79,27
	RV05 M2	3,966	79,088	
	RV05 M3	3,860	77,178	
Quebrada La Baja	QB M1	0,663	13,213	12,40
	QB M2	0,592	11,822	
	QB M3	0,610	12,164	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,451	8,995	8,99
	RSp M2	0,486	9,704	
	RSp M3	0,415	8,296	

Fuente: Autoras

Anexo P. (Continuación) Concentración de plomo en los sedimentos por triplicado día 15/09/2016

Nombre	Código	mgPb/L	mgPb/Kg	Promedio mgPb/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,998	19,913	18,77
	RV02 M2	0,928	18,547	
	RV02 M3	0,894	17,857	
	RV05 M1	4,070	81,182	78,92
	RV05 M2	3,930	78,463	
	RV05 M3	3,860	77,127	
Quebrada La Baja	QB M1	0,632	12,608	12,733
	QB M2	0,702	14,022	
	QB M3	0,580	11,570	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,545	10,881	10,179
	RSp M2	0,510	10,175	
	RSp M3	0,475	9,480	

Fuente: Autoras

Anexo Q. Curva de calibración de Zinc.

Concentración mgZn/L	Absorbancia	Absorbancia	Absorbancia
0,1	0,041	0,039	0,043
0,2	0,079	0,082	0,08
0,5	0,198	0,198	0,189
1,0	0,398	0,395	0,397
1,5	0,599	0,595	0,593
2,5	0,969	0,971	0,975
R ²	0,9996	0,9999	0,9998

Fuente: Autoras

Anexo R. Concentración de Zinc en los sedimentos por triplicado día 22/07/2016

Nombre	Código	mgZn/L	mgZn/Kg	Promedio mgZn/Kg
Río Vetás	RV02 M1	0,838	16,76	16,51
	RV02 M2	0,818	16,33	
	RV02 M3	0,825	16,44	
	RV05 M1	1,333	26,61	26,56
	RV05 M2	1,323	26,38	
	RV05 M3	1,338	26,70	
Quebrada La Baja	QB M1	1,183	236,52	236,50
	QB M2	1,165	232,94	
	QB M3	1,201	240,07	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,830	16,56	16,043
	RSp M2	0,797	15,92	
	RSp M3	0,784	15,64	

Fuente: Autoras

Anexo S. (Continuación) Concentración de Zinc en los sedimentos por triplicado día 12/08/2016

Nombre	Código	mgZn/L	mgZn/Kg	Promedio mgZn/Kg
Río Vetas	RV02 M1	1,003	20,035	18,21
	RV02 M2	0,882	17,618	
	RV02 M3	0,851	16,988	
	RV05 M1	1,377	27,468	27,05
	RV05 M2	1,341	26,774	
	RV05 M3	1,349	26,898	
Quebrada La Baja	QB M1	1,263	252,374	243,707
	QB M2	1,191	237,324	
	QB M3	1,209	241,424	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,925	18,468	17,139
	RSp M2	0,840	16,788	
	RSp M3	0,809	16,161	

Fuente: Autoras

Anexo T. (Continuación) Concentración de Zinc en los sedimentos por triplicado día
12/09/2016

Nombre	Código	mgZn/L	mgZn/Kg	Promedio mgZn/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,908	18,135	18,30
	RV02 M2	0,885	17,671	
	RV02 M3	0,956	19,089	
	RV05 M1	1,383	27,591	28,93
	RV05 M2	1,478	29,494	
	RV05 M3	1,488	29,704	
Quebrada La Baja	QB M1	1,222	243,512	250,808
	QB M2	1,271	253,492	
	QB M3	1,281	255,420	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,851	16,993	17,713
	RSp M2	0,944	18,843	
	RSp M3	0,867	17,302	

Fuente: Autoras

Anexo U. Curva de calibración de Cromo.

Concentración mgCr/L	Absorbancia	Absorbancia	Absorbancia
0,1	0,011	0,010	0,013
0,2	0,024	0,029	0,022
0,5	0,053	0,048	0,045
1,0	0,083	0,086	0,088
2,5	0,211	0,201	0,205
4,0	0,335	0,328	0,321
5,0	0,413	0,404	0,41
7,0	0,567	0,563	0,568
R ²	0,9996	0,9997	0,9998

Fuente: Autoras

Anexo V. (Continuación) Concentración de Cromo en los sedimentos por triplicado día 26/07/2016

Nombre	Código	mgCr/L	mgCr/Kg	Promedio mgCr/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,134	2,69	2,605
	RV02 M2	0,110	2,19	
	RV02 M3	0,147	2,94	
	RV05 M1	0,172	3,43	2,93
	RV05 M2	0,147	2,93	
	RV05 M3	0,122	2,44	
Quebrada La Baja	QB M1	0,197	3,93	3,518
	QB M2	0,172	3,44	
	QB M3	0,159	3,19	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,097	1,94	1,941
	RSp M2	0,110	2,19	
	RSp M3	0,085	1,69	

Fuente: Autoras

Anexo W. (Continuación) Concentración de Cromo en los sedimentos por triplicado día 18/08/2016

Nombre	Código	mgCr/L	mgCr/Kg	Promedio mgCr/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,116	2,324	2,58
	RV02 M2	0,142	2,830	
	RV02 M3	0,129	2,575	
	RV05 M1	0,167	3,329	3,33
	RV05 M2	0,180	3,585	
	RV05 M3	0,154	3,076	
Quebrada La Baja	QB M1	0,154	3,081	3,41
	QB M2	0,167	3,325	
	QB M3	0,192	3,836	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,116	2,319	2,06
	RSp M2	0,091	1,819	
	RSp M3	0,104	2,065	

Fuente: Autoras

Anexo X. (Continuación) Concentración de Cromo en los sedimentos por triplicado día 22/09/2016 2

Nombre	Código	mgCr/L	mgCr/Kg	Promedio mgCr/Kg
Río Vetas	RV02 M1	0,144	2,887	2,63
	RV02 M2	0,132	2,632	
	RV02 M3	0,120	2,383	
	RV05 M1	0,169	3,378	3,30
	RV05 M2	0,182	3,629	
	RV05 M3	0,144	2,884	
Quebrada La Baja	QB M1	0,157	3,127	3,54
	QB M2	0,194	3,879	
	QB M3	0,182	3,627	
Río Suratá (Playa)	RSp M1	0,095	1,889	1,88
	RSp M2	0,082	1,638	
	RSp M3	0,107	2,138	

Fuente: Autoras

Anexo Y. Curva de calibración de mercurio.

Concentración $\mu\text{Hg/L}$	Absorbancia
1	0,009
2	0,017
5	0,048
8	0,078
10	0,101

Fuente: Autoras

Anexo Z. Conversión de $\mu\text{gHg/L}$ en mgHg/Kg de los sedimentos día 23/09/2016

Nombre	Código	$\mu\text{gHg/L}$	mgHg/L	mgHg/Kg	Promedio mgHg/Kg
Río Vetas	RV02 M1	30,17	0,03	3,01	3,01
	RV02 M2	34,25	0,03	3,05	
	RV02 M3	31,58	0,03	2,99	
	RV05 M1	29,17	0,03	2,52	2,54
	RV05 M2	29,46	0,03	2,58	
	RV05 M3	29,33	0,03	2,50	
Quebrada La Baja	QB M1	85,83	0,09	7,78	7,80
	QB M2	84,83	0,08	7,90	
	QB M3	83,83	0,08	7,71	
Río Suratá (La Playa)	RSp M1	28,79	0,03	2,63	2,58
	RSp M2	26,42	0,03	2,47	
	RSp M3	27,17	0,03	2,63	

Fuente: Autoras