

**ESTABLECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE PARA LA CONCENTRACIÓN DE  
LOS METALES CARACTERÍSTICOS DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS EN LOS  
RÍOS OTÚN, QUINDÍO Y CAMPOALEGRE POR EL MÉTODO DE  
ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.**

**JUAN SEBASTIÁN RESTREPO GIRALDO  
KEVIN ANDRÉS CORREA ALZATE**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  
TECNOLOGÍA QUÍMICA  
PEREIRA  
2014**

**ESTABLECIMIENTO DE LA LINEA BASE PARA LA CONCENTRACIÓN DE  
LOS METALES CARACTERÍSTICOS DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS EN LOS  
RÍOS OTÚN, QUINDÍO Y CAMPOALEGRE POR EL MÉTODO DE  
ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.**

**JUAN SEBASTIÁN RESTREPO GIRALDO  
CC. 1088307514  
KEVIN ANDRÉS CORREA ALZATE  
CC. 1087555543**

**Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Química**

**DIRECTOR:  
ARIEL FELIPE ARCILA ZAMBRANO  
Químico industrial**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS  
TECNOLOGÍA QUÍMICA  
PEREIRA  
2014**

**Nota de aceptación:** \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

**ARIEL FELIPE ARCILA ZAMBRANO**

**Químico Industrial**

**Director**

---

**CARLOS HUMBERTO MONTOYA NAVARRETE**

**Químico Industrial**

**Jurado**

## **AGRADECIMIENTOS.**

A "Chuchito" por ser el apoyo y motor inmaterial que nos llevó a cumplir satisfactoriamente esta meta.

A nuestros padres por ser ese apoyo incondicional en nuestro camino hacia la consecución de nuestras metas.

A nuestro director Ariel Felipe Arcila Zambrano por compartir con nosotros un poco de sus conocimientos, por su paciencia, dedicación y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A todo el personal del Laboratorio de Análisis de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira por su paciencia y comprensión en la realización de la parte experimental de este proyecto.

A todos nuestros profesores, compañeros y amigos que en nuestra vida universitaria aportaron su granito de arena para enriquecer nuestro proceso de aprendizaje.

## CONTENIDO

Pág.

### RESUMEN

1.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
2.	JUSTIFICACIÓN.....	2
3.	OBJETIVOS.....	3
3.1.	OBJETIVOS GENERALES.....	3
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
4.	MARCO TEÓRICO.....	4
4.1.	CONTEXTUALIZACIÓN : VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ.....	4
4.2.	CENIZAS VOLCÁNICAS.....	11
4.2.1.	Generalidades.....	11
4.2.2.	Composición.....	11
4.2.2.1.	Arsénico.....	12
4.2.2.2.	Cadmio.....	12
4.2.2.3.	Cobre.....	13
4.2.2.4.	Cromo.....	14
4.2.2.5.	Magnesio.....	14
4.2.2.6.	Mercurio.....	15
4.2.2.7.	Níquel.....	16
4.2.2.8.	Plomo.....	17
4.2.2.9.	Potasio.....	17
4.2.2.10.	Sodio.....	18
4.2.2.11.	Zinc.....	19
4.3.	GENERALIDADES DEL AGUA.....	19
4.3.1.	Características de las fuentes comunes de agua.....	20
4.3.2.	Metales presentes en el agua.....	20
4.4.	CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR CENIZAS VOLCÁNICAS.....	21
4.4.1.	Turbiedad.....	21
4.4.2.	Ph.....	22
4.4.3.	Flúor.....	22
4.5.	AFLUENTES INVOLUCRADOS EN PROYECTO.....	22
4.5.1.	Río Campoalegre.....	22
4.5.2.	Río Quindío.....	23
4.5.3.	Río Otún.....	23
4.6.	ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	24
4.6.1.	Generalidades.....	24
4.6.2.	Técnicas por espectrometría de absorción atómica.....	24
4.6.2.1.	Espectrometría de absorción atómica de llama.....	24

4.6.2.2.	Espectrometría de absorción atómica - Horno de grafito.....	26
4.6.2.3.	Espectrometría de Absorción Atómica - Vapor Frío.....	27
4.7.	CONCEPTOS ESTADÍSTICO.....	28
4.7.1.	Linealidad.....	28
4.7.2.	Desviación estándar.....	28
4.7.3.	Límite de detección (LOD).....	29
4.7.4.	Límite de cuantificación (LOC).....	29
4.8.	ASPECTOS LEGALES DE COMPARACIÓN.....	29
4.8.1.	Resolución 2115 de 2007.....	30
4.8.2.	Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life (Guía canadiense de la calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática).....	31
5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
5.1.	MATERIALES.....	33
5.1.1.	Reactivos.....	33
5.1.2.	Material de vidrio.....	33
5.1.3.	Otros materiales.....	34
5.1.4.	Equipos de medición.....	34
5.1.4.1.	Espectrofotómetro de absorción atómica y accesorios.....	34
5.1.4.2.	Nefelómetro (Turbidímetro).....	35
5.1.4.3.	Potenciómetro.....	35
5.1.5.	Muestras para el análisis.....	36
5.2.	METODOLOGIAS.....	38
5.2.1.	Metodología de muestreo.....	38
5.2.2.	Metodología para la cuantificación de metales por espectrofotometría de absorción atómica. ....	41
5.2.2.1.	Preparación de curvas de calibración.....	41
5.2.2.1.1.	Curva de calibración para Cadmio, Cobre, Cromo, Magnesio, Potasio, Sodio y Zinc.....	41
5.2.2.1.2.	Curva de calibración para Níquel y Plomo (Método de concentración).....	43
5.2.2.1.3.	Curva de calibración para Mercurio.....	44
5.2.2.1.4.	Curva de calibración para Arsénico.....	45
5.2.2.2.	Digestiones ácidas para muestras de agua.....	46
5.2.2.2.1.	Digestión para Cadmio, Cobre, Magnesio, Potasio, Sodio y Zinc.....	46
5.2.2.2.2.	Digestión para Níquel y Plomo.....	47
5.2.2.2.3.	Digestión para Mercurio .....	47
5.2.2.3.	Digestiones ácidas para muestras de sedimentos y cenizas.....	48
5.2.2.3.1.	Digestión para Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Magnesio, Níquel, Plomo, Potasio, Sodio y Zinc en Sedimentos y Cenizas.....	48
5.2.2.3.2.	Digestión para mercurio en Sedimentos y Cenizas.....	49
5.2.3.	Cuantificación de fluoruros por el método potenciométrico de ión selectivo.....	50

5.2.3.1.	Preparación de curvas de calibración.....	50
5.2.3.2.	Preparación de muestras para medición.....	51
5.2.4.	Determinación de la turbiedad en muestras de agua.....	51
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
6.1.	DETERMINACIÓN DE METALES EN AGUA, SEDIMENTOS Y CENIZAS VOLCÁNICAS POR ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	52
6.1.1.	Arsénico.....	52
6.1.1.1.	Curvas de calibración.....	52
6.1.1.2.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	53
6.1.1.3.	Resultados para análisis de sedimentos y cenizas.....	55
6.1.2.	Cadmio.....	56
6.1.2.1.	Límite de detección y cuantificación del equipo para Cadmio.....	56
6.1.2.2.	Curvas de calibración.....	57
6.1.2.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	58
6.1.2.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	59
6.1.3.	Cobre.....	60
6.1.3.1.	Límite de detección del equipo.....	61
6.1.3.2.	Curvas de calibración.....	61
6.1.3.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	63
6.1.3.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	64
6.1.4.	Cromo.....	65
6.1.4.1.	Curvas de calibración.....	66
6.1.4.2.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	66
6.1.4.3.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	68
6.1.5.	Magnesio.....	69
6.1.5.1.	Límite de detección del equipo.....	69
6.1.5.2.	Curvas de calibración.....	70
6.1.5.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	71
6.1.5.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	73
6.1.6.	Mercurio.....	73
6.1.6.1.	Curvas de calibración.....	74
6.1.6.2.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	75
6.1.6.3.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	77
6.1.7.	Níquel.....	78
6.1.7.1.	Límite de detección del equipo.....	78
6.1.7.2.	Curvas de calibración.....	79
6.1.7.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	80
6.1.7.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	82
6.1.8.	Plomo.....	83
6.1.8.1.	Límite de detección del equipo.....	83

6.1.8.2.	Curvas de calibración.....	84
6.1.8.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	85
6.1.8.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	87
6.1.9.	Potasio.....	88
6.1.9.1.	Límite de detección del equipo.....	88
6.1.9.2.	Curvas de calibración.....	88
6.1.9.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	90
6.1.9.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	91
6.1.10.	Sodio.....	92
6.1.10.1.	Límite de detección del equipo.....	92
6.1.10.2.	Curvas de calibración.....	93
6.1.10.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	94
6.1.10.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Ceniza.....	96
6.1.11.	Zinc.....	97
6.1.11.1.	Límite de detección del equipo.....	97
6.1.11.2.	Curvas de calibración.....	98
6.1.11.3.	Resultados para análisis de muestras de agua.....	99
6.1.11.4.	Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas.....	100
6.2.	DETERMINACIÓN DE FLUORUROS EN MUESTRAS DE AGUA, SEDIMENTOS Y CENIZAS VOLCÁNICAS POR MÉTODO POTENCIOMÉTRICO. ....	101
6.2.1.	Curvas de calibración.....	102
6.2.2.	Resultados de cuantificación de fluoruros en muestras de agua.....	103
6.2.3.	Resultados de cuantificación de fluoruros en muestras de Sedimentos y cenizas.....	104
6.3.	DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD EN MUESTRAS DE AGUA.....	105
6.4.	PROMEDIO DE LA TURBIEDAD Y CONCENTRACIÓN DE METALES ESTUDIADOS Y FLUORUROS EN EL AGUA DE LOS RÍOS CAMPOALEGRE, OTÚN Y QUINDÍO.....	107
7.	CONCLUSIONES.....	109
8.	RECOMENDACIONES.....	109

## **ANEXOS**

### **ANEXO A**

## INDICE DE TABLAS.

### Pág.

<b>Tabla 1:</b> Resumen de novedades en boletines mensuales del SGC (2006 /2013).....	7
<b>Tabla 2.</b> Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.....	30
<b>Tabla 3.</b> Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana.....	30
<b>Tabla 4.</b> Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.....	31
<b>Tabla 5.</b> Guía de calidad de los sedimentos para la protección de la vida acuática.....	31
<b>Tabla 6.</b> Equipos de espectrometría de absorción atómica y accesorios Utilizados.....	35
<b>Tabla 7.</b> Cronograma de muestreos: Río Otún.....	39
<b>Tabla 8.</b> Cronograma de muestreos: Río Quindío.....	40
<b>Tabla 9.</b> Cronograma de muestreos: Río Campoalegre.....	40
<b>Tabla 10.</b> Preparación de patrones para los metales de 5.2.2.1.1, a partir de sus soluciones estándar de 10 mg/L.....	42
<b>Tabla 11.</b> Preparación de patrones para curvas de calibración de Plomo y Níquel a partir de solución madre de 50 mg/L en Pb o Ni.....	44
<b>Tabla 12.</b> Preparación de patrones de mercurio a partir de solución estándar de 100 µg/L.....	45
<b>Tabla 13.</b> Preparación de patrones de Arsénico a partir de solución estándar de 200 µg/L.....	46
<b>Tabla 14.</b> Tabla resumen de curvas de calibración de Arsénico.....	52

<b>Tabla 15.</b> Reporte de cuantificación de Arsénico en aguas.....	53
<b>Tabla 16.</b> Reporte de cuantificación de Arsénico en Sedimentos y Cenizas.....	55
<b>Tabla 17.</b> Lecturas de patrón de CADMIO de 0,5 mg/L.....	56
<b>Tabla 18.</b> Curvas de calibración de cadmio (Cd).....	57
<b>Tabla 19.</b> Datos para curvas de calibración de Cadmio (Cd).....	57
<b>Tabla 20.</b> Reporte de cuantificación de Cadmio en aguas.....	58
<b>Tabla 21.</b> Reporte de cuantificación de Cadmio en Sedimentos y Cenizas.....	59
<b>Tabla 22.</b> Lecturas de patrón de COBRE de 0,3 mg/L.....	61
<b>Tabla 23.</b> Curvas de calibración de Cobre (Cu).....	61
<b>Tabla 24.</b> Datos para curvas de calibración de Cobre (Cu).....	62
<b>Tabla 25.</b> Reporte de cuantificación de Cobre en aguas.....	63
<b>Tabla 26.</b> Reporte de cuantificación de Cobre en Sedimentos y Cenizas.....	64
<b>Tabla 27.</b> Tabla resumen de curvas de calibración de Cromo.....	66
<b>Tabla 28.</b> Reporte de cuantificación de Cromo en aguas.....	66
<b>Tabla 29.</b> Reporte de cuantificación de Cromo en Sedimentos y Cenizas.....	68
<b>Tabla 30.</b> Lecturas de patrón de MAGNESIO de 0,1 mg/L.....	70
<b>Tabla 31.</b> Curvas de calibración de magnesio (Mg).....	70
<b>Tabla 32.</b> Datos para curvas de calibración de Magnesio (Mg).....	71
<b>Tabla 33.</b> Reporte de cuantificación de Magnesio en aguas.....	71
<b>Tabla 34.</b> Reporte de cuantificación de Magnesio en Sedimentos y Cenizas...	73
<b>Tabla 35.</b> Tabla resumen de curvas de calibración de mercurio.....	74
<b>Tabla 36.</b> Reporte de cuantificación de Mercurio en aguas.....	75

<b>Tabla 37.</b> Reporte de cuantificación de Mercurio en Sedimentos y Cenizas.....	77
<b>Tabla 38.</b> Lecturas de patrón de NÍQUEL de 1 mg/L.....	78
<b>Tabla 39.</b> Curvas de calibración de Níquel (Ni).....	79
<b>Tabla 40.</b> Datos para curvas de calibración de Níquel (Ni).....	79
<b>Tabla 41.</b> Reporte de cuantificación de Níquel en aguas.....	80
<b>Tabla 42.</b> Reporte de cuantificación de Níquel en Sedimentos y Cenizas.....	82
<b>Tabla 43.</b> Lecturas de patrón de PLOMO de 2 mg/L.....	83
<b>Tabla 44.</b> Curvas de calibración de Plomo (Pb).....	84
<b>Tabla 45.</b> Datos para curvas de calibración de Plomo (Pb).....	84
<b>Tabla 46.</b> Reporte de cuantificación de Plomo en aguas.....	85
<b>Tabla 47.</b> Reporte de cuantificación de Plomo en Sedimentos y Cenizas.....	87
<b>Tabla 48.</b> Lecturas de patrón de POTASIO de 0,3 mg/L.....	88
<b>Tabla 49.</b> Curvas de calibración de Potasio (K).....	88
<b>Tabla 50.</b> Datos para curvas de calibración de Potasio (K).....	89
<b>Tabla 51.</b> Reporte de cuantificación de Potasio en aguas.....	90
<b>Tabla 52.</b> Reporte de cuantificación de Potasio en Sedimentos y Cenizas.....	91
<b>Tabla 53.</b> Lecturas de patrón de SODIO de 0,3 mg/L.....	93
<b>Tabla 54.</b> Curvas de calibración de Sodio (Na).....	93
<b>Tabla 55.</b> Datos para curvas de calibración de Sodio (Na).....	94
<b>Tabla 56.</b> Reporte de cuantificación de Sodio en aguas.....	94
<b>Tabla 57.</b> Reporte de cuantificación de Sodio en Sedimentos y Cenizas.....	96
<b>Tabla 58.</b> Lecturas de patrón de ZINC de 0,1 mg/L.....	97
<b>Tabla 59.</b> Curvas de calibración de Zinc.....	98

<b>Tabla 60.</b> Datos para curvas de calibración de Zinc (Zn).....	98
<b>Tabla 61.</b> Reporte de cuantificación de Zinc en aguas.....	99
<b>Tabla 62.</b> Reporte de cuantificación de Zinc en Sedimentos y Cenizas.....	100
<b>Tabla 63.</b> Curvas de calibración para fluoruros.....	102
<b>Tabla 64.</b> Datos para curvas de calibración de fluoruros (F <sup>-</sup> ).....	102
<b>Tabla 65.</b> Reporte de cuantificación de fluoruros en muestras de agua.....	103
<b>Tabla 66.</b> Reporte de cuantificación de fluoruros en Sedimentos y Cenizas.....	104
<b>Tabla 67.</b> Turbiedad de las muestras estudiadas.....	105
<b>Tabla 68.</b> Concentración promedio de metales estudiados en muestras de agua de los ríos Campoalegre, Otún y Quindío.....	107
<b>Tabla 69.</b> Concentración promedio de fluoruros presentes en el agua de los ríos Campoalegre, Otún y Quindío en mg/L.....	108
<b>Tabla 70.</b> Promedio de las turbiedades de las muestras de agua de los ríos Campoalegre, Otún y Quindío en NTU.....	108

## INDICE DE GRÁFICAS

**Pág.**

<b>Figura 1:</b> Mapa esquemático de la zona volcánica Ruiz – Tolima, con drenajes principales de los volcanes: nevados del Ruiz, Santa Isabel y Tolima.....	4
<b>Figura 2:</b> Fotos que evidencian capacidad de desplazamiento de cenizas volcánicas (Junio, 2012).....	21
<b>Figura 3.</b> Etapas de atomización de una muestra en EAA de llama.....	25
<b>Figura 4.</b> Ilustración de un atomizador para EAA de llama.....	26
<b>Figura 5.</b> Ilustración del atomizador por horno de grafito.....	27
<b>Figura 6.</b> Unidad vaporizadora de mercurio SHIMADZU MVU-1A.....	28
<b>Figura 7.</b> Equipos de espectrometría de absorción atómica utilizados.....	34
<b>Figura 8.</b> Equipo para determinar turbiedad.....	35
<b>Figura 9.</b> Equipo para cuantificar fluoruros por ISE.....	36
<b>Figura 10</b> Desarenador Campoalegre (lateral izq. y sup. Derecha) y bocatoma Campoalegre (acueducto de Chinchiná y Pensilvania, Caldas).....	37
<b>Figura 11.</b> Registro fotográfico de punto de muestreo (Río Quindío).....	37
<b>Figura 12.</b> Registro fotográfico de puntos de muestreo dentro de la planta de tratamiento de Villa Santana.....	38
<b>Figura 13.</b> Procedimiento para la preparación de una curva de calibración para Zinc. ....	41
<b>Figura 14.</b> Procedimiento para la preparación curvas de calibración de Plomo.....	43
<b>Figura 15.</b> Procedimiento para la preparación de curvas de calibración de mercurio.....	44

<b>Figura 16.</b> Procedimiento para la preparación de curvas de calibración de arsénico.....	45
<b>Figura 17.</b> Procedimiento para digestión con HCl en muestras de agua (3030C).....	46
<b>Figura 18.</b> Procedimiento para digestión con HNO <sub>3</sub> por concentración de las muestras de agua.....	47
<b>Figura 19.</b> Procedimiento: digestión de muestras de agua (HNO <sub>3</sub> / HCl y KMnO <sub>4</sub> ).....	47
<b>Figura 20.</b> Ilustración de Secado, tamizado y preservación de sedimentos.....	48
<b>Figura 21.</b> Procedimiento para digestión ácida con HCl / HNO <sub>3</sub> en Sedimentos.....	49
<b>Figura 22.</b> Ilustración de digestión y preparación de la muestra con KMnO <sub>4</sub> .....	49
<b>Figura 23.</b> Procedimiento para digestión con HNO <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> y KMnO <sub>4</sub> .....	50
<b>Figura 24.</b> Procedimiento para preparación de curvas de calibración para fluoruros.....	50
<b>Figura 25.</b> Procedimiento para la preparación y medición de fluoruros en agua.....	51
<b>Figura 26.</b> Procedimiento para determinar la turbiedad de una muestra de agua.....	51
<b>Figura 27.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Arsénico en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	54
<b>Figura 28.</b> Curvas de calibración para Cadmio (Cd).....	57
<b>Figura 29.</b> Curva de calibración de Cadmio C#6 para cenizas y sedimentos.....	58
<b>Figura 30.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Cadmio en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	59
<b>Figura 31.</b> Curvas de calibración para Cobre (Cu).....	62
<b>Figura 32.</b> Curva de calibración de Cobre C#6 para cenizas y sedimentos.....	62

<b>Figura 33.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Cobre en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	64
<b>Figura 34.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Cromo en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	67
<b>Figura 35.</b> Curvas de calibración para Magnesio (Mg).....	70
<b>Figura 36.</b> Curva de calibración de Magnesio C#6 para cenizas y sedimentos.....	71
<b>Figura 37.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Magnesio en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	72
<b>Figura 38.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Mercurio en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	76
<b>Figura 39.</b> Curvas de calibración para Níquel (Ni).....	79
<b>Figura 40.</b> Curva de calibración de Níquel C#6 para cenizas y sedimentos.....	80
<b>Figura 41.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Níquel en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	81
<b>Figura 42.</b> Curvas de calibración para Plomo (Pb).....	84
<b>Figura 43.</b> Curva de calibración de Plomo C#6 para cenizas y sedimentos.....	85
<b>Figura 44.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Plomo en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	86
<b>Figura 45.</b> Curvas de calibración para Potasio.....	89
<b>Figura 46.</b> Curva de calibración de Potasio C#7 para cenizas y sedimentos.....	89
<b>Figura 47.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Potasio en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	91
<b>Figura 48.</b> Curvas de calibración para Sodio (Na).....	93
<b>Figura 49.</b> Curva de calibración de Sodio C#7 para cenizas y sedimentos.....	94

<b>Figura 50.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Sodio en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	95
<b>Figura 51.</b> Curvas de calibración para Zinc (Zn).....	98
<b>Figura 52.</b> Curva de calibración de Zinc C#8 para cenizas y sedimentos.....	99
<b>Figura 53.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Zinc en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	100
<b>Figura 54.</b> Curvas de calibración para cuantificación de fluoruros.....	102
<b>Figura 55.</b> Gráfica de comportamiento de la concentración de Fluoruros en los diferentes ríos según el número de muestreo.....	104
<b>Figura 56.</b> Gráfica de comportamiento de la turbiedad en las muestras de los ríos analizadas.....	105

## RESUMEN.

Durante los últimos años el volcán nevado del Ruiz (**VNR**), uno de los más activos de la cadena volcánica de los Andes, localizado en territorio colombiano entre los departamentos de Caldas y Tolima, ha presentado cambios en su actividad volcánica, representando para las poblaciones aledañas un peligro potencial en salud e infraestructura, trayendo a la memoria de todos los colombianos y colombianas la tragedia de Armero, Tolima en 1985 cuando un gran lahar arrasó el pueblo de Armero, Tolima y cobró la vida de 25000 personas. Desde el aumento en la actividad sísmica del VNR el 30 de septiembre de 2010, se han producido múltiples emisiones de ceniza volcánica y material piroclástico que en algunos casos han alcanzado poblaciones urbanas y rurales de los departamentos de Caldas, Risaralda, Antioquia y norte del Valle del Cauca.

Las cenizas volcánicas se caracterizan por ser partículas muy pequeñas que viajan con facilidad a través de las corrientes de aire, ricas en una gran variedad de metales en forma de óxidos que pueden alterar los ecosistemas presentes en el rango de afectación. Por ejemplo, la contaminación de las fuentes hídricas producto de la alta emisión de cenizas volcánicas causa un aumento en la turbiedad del agua, la acidez y la concentración de fluoruros, entre otros. El siguiente trabajo pretende conocer la concentración promedio de algunos de los metales característicos de las cenizas volcánicas como Arsénico (As) Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Magnesio (Mg), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Potasio (K), Sodio (Na) y Zinc (Zn) a través de la técnica de espectroscopía de absorción atómica en los afluentes que abastecen de agua para consumo humano en algunos municipios del eje cafetero (Río Otún, Quindío y Campoalegre) que sirva como base de datos para realizar un plan de control de riesgos para cualquier ente de control que lo desee y así permita sortear de la mejor manera la problemática referente al agua que se puede presentar ante una inminente erupción de cenizas del VNR tal y como se ha presentado desde abril de 2012.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El volcán nevado del Ruiz (VNR) presentó cambios en su actividad volcánica en septiembre de 2010, fecha a partir de la cual se modificó su comportamiento sísmico, obligando al cambio de nivel de actividad después de varios años de relativa calma. Han sido múltiples las emisiones de ceniza y material piroclástico que se han presentado desde entonces (**Ver tabla 1.**) En algunos de estos episodios de emisión, las cenizas han tenido un alcance tal que se obtuvieron reportes de caída de ceniza en diferentes municipios de los departamentos de Caldas, Risaralda, Antioquia y norte del Valle del Cauca [1]

Las cenizas volcánicas se caracterizan por ser ricas en diferentes metales que en ocasiones pueden ser perjudiciales para los ecosistemas naturales, tal y como se podría presentar en las diferentes fuentes hídricas que se encuentran dentro del rango de afectación por contacto con dicho material volcánico, este hecho crea la necesidad de conocer una línea de referencia que para el hipotético caso de una fuerte erupción de cenizas, permita a los diferentes acueductos y entes de control conocer el nivel de afectación que este haya provocado sobre las principales fuentes hídricas que abastecen a los acueductos de las principales ciudades del eje cafetero.

Algunos de los metales presentes en las cenizas volcánicas y demás material piroclástico pueden estar disueltos en las aguas de aquellos afluentes a estudiar, lo cual representaría un riesgo para la salud de los ciudadanos que se benefician de estos o de algunos animales que habitan estas zona, pues en caso de ingerirse abundante cantidad de estas aguas potencialmente contaminadas, incrementaría la probabilidad de desarrollarse patologías que van desde alteraciones en la glándula tiroidea hasta enfermedades respiratorias y coronarias.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El cambio en el comportamiento del volcán nevado del Ruiz es un evento geológico que no solo ha impactado a la sociedad desde una perspectiva psicológica por traer a la memoria de los colombianos y colombianas aquella catástrofe de Armero, Tolima en noviembre de 1985, sino también desde la perspectiva del común vivir de las personas vulnerables, entendiendo que factores biológicos y eventos climatológicos han generado afectación a causa de episodios inducidos, como lo son las tormentas eléctricas y las enfermedades respiratorias ocasionadas por la inhalación de material particulado emanado por el volcán. Teniendo en cuenta que durante algunos de los episodios de anomalía más recientes ocurridos en el VNR, las cenizas expulsadas lograron desplazarse distancias lo suficientemente largas para alcanzar diferentes asentamientos urbanos del eje cafetero y posiblemente las diferentes fuentes hídricas que abastece sus acueductos, se pretende conocer la concentración promedio de algunos de los metales característicos de las cenizas volcánicas como Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Zinc (Zn)) [2] y otros, en las fuentes hídricas que abastecen a los acueductos de Pereira, algunos municipios de Quindío, incluida su capital y Chinchiná (representación del departamento de Caldas que ha sido afectado entre otras por caída de cenizas volcánicas en su territorio), que sirva como base de datos para cualquier ente que desee realizar un plan de control de riesgos en los afluentes estudiados y aporte información de soporte para la creación o validación de acciones de prevención a las empresas de servicios públicos con el fin de atender la alerta emitida por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en mayo de 2012.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio de la concentración de metales característicos de las cenizas volcánicas en el agua de los ríos Otún, Quindío y Campoalegre, con el fin de crear una línea de referencia que permita detectar si existen o no alteraciones en la concentración de dichos metales en los mencionados afluentes, cuando se presente actividad volcánica atípica.

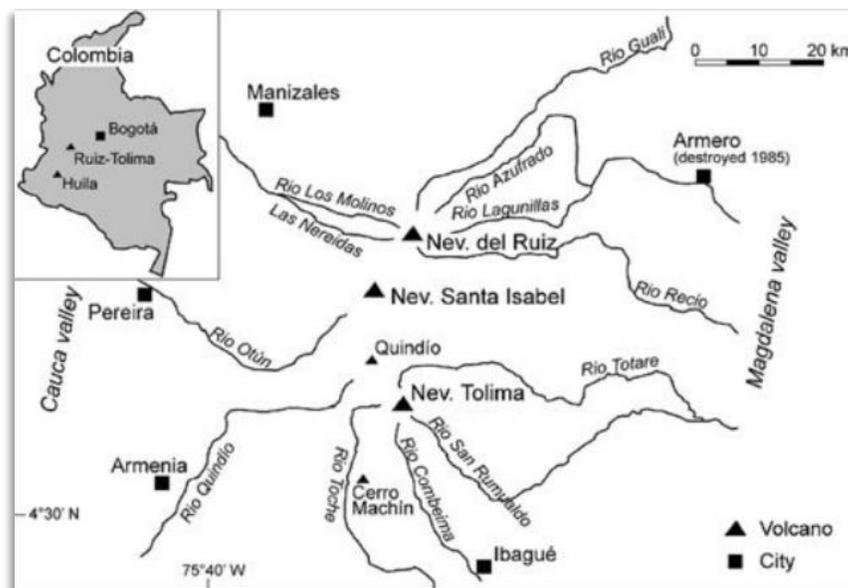
#### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Realizar muestreos en las respectivas fuentes de abastecimiento de agua para los acueductos de Pereira, algunos municipios de Quindío, incluida su capital y Chinchiná, haciendo uso de números aleatorios para determinar los días de ejecución.
- Estudiar las concentraciones de los metales: arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, mercurio, plomo, zinc, sodio, magnesio y potasio en cenizas provenientes del Volcán Nevado del Ruiz y en sedimentos de los ríos Otún, Quindío y Campoalegre a través del método de espectroscópica de absorción atómica.
- Estudiar la concentración de fluoruros presente en una muestra de ceniza del VNR, el agua de los ríos a estudiar y muestras de sus sedimentos.
- Realizar un seguimiento a la turbiedad de las muestras tomadas para determinar un valor promedio de dicho parámetro.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. CONTEXTUALIZACIÓN : VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ

El volcán nevado del Ruiz es un estratovolcán activo cubierto por un glaciar espeso; abarca un área de más de 200 km<sup>2</sup> [3] y está localizado entre los departamentos de Caldas y Tolima en la parte media de la cordillera central de Colombia (4° 53' 43"N, 75° 19' 21" W). Forma parte de la cadena volcánica de los Andes siendo este uno de sus volcanes más activos. “La mesa de Herveo”, como también se le conoce, presenta una geometría alargada en dirección nororiente – suroccidente y es cónica aplanada en la parte superior. El diámetro de su base es de 15 km y su mayor elevación de 5321 m.s.n.m. definida por tres cimas principales: El cráter Arenas, que es hasta el momento el único centro de emisión activo, localizado en la parte nororiental del aparato geológico, que consta de 870 por 830m de abertura y 247m de profundidad, y los cráteres parásitos denominados Pirañas o Pirámide al nororiente y La Olleta al occidente, que permanecen en estado inactivo. [1] [4] [5]



**Figura 1.** Mapa esquemático de la zona volcánica Ruiz – Tolima, con los drenajes principales de los volcanes: nevados del Ruiz, Santa Isabel y Tolima [6].

La historia eruptiva del volcán nevado del Ruiz data de aproximadamente 1,8 millones de años (1,8 Ma), en los que se han presentado eventos de construcción y destrucción de tres edificios volcánicos durante tres periodos eruptivos principales que [7] denomina: Ruiz Ancestral, Ruiz antiguo y Ruiz Presente.

El primer periodo comenzó hace aproximadamente 1,8 Ma y finalizó 0,8 Ma después. Este consistió en la formación de un gran estratovolcán por acumulación de gruesas secuencias de lavas andesíticas y dacíticas producidas por varios centros de emisión volcánicos que coalescieron como una sola unidad [5], lo que fue seguido por su colapso parcial con formación de una caldera, suceso que se cree ocurrió entre 1,0 y 0,8 Ma atrás. El Segundo periodo, Ruiz antiguo, se destacó por la construcción en tres etapas de un estratovolcán debido a flujos de lava, este acontecimiento se dio hace 0,8 Ma y concluyó 0,6 Ma después, cuando comenzó la formación de una caldera en la cumbre que finalizó hace 0,15 Ma. En el último periodo, que corresponde al Ruiz Presente, domos de lava probablemente llenaron la caldera de la cumbre del volcán.

En la actualidad, el volcán nevado del Ruiz posee un amplio historial de devastación producto de sus manifestaciones a través de la historia, que se han caracterizado por la formación de catastróficos lahares debido a la fusión de la capa de hielo que se posa sobre la cima del edificio volcánico [3]. Los primeros registros eruptivos que se conocen datan de principios de 1595 [8], época en la cual el cronista franciscano Fray Pedro de Simón situó un fenómeno en el que describía entre otros, los siguientes acontecimientos: fuertes explosiones provenientes del cerro donde nace el río Gualí y río Lagunilla (nevado del Ruiz), asombrosas crecientes, olor pestilente a azufre, avalancha de lo que parecía “tierra y cenizas” y abundante precipitación de piedra pómez y ceniza, manifestando la presencia cuantiosa de esta última en territorio de Cartago (hoy en día, la ciudad de Pereira, Risaralda). Esta completa descripción permite determinar sin lugar a duda que el fenómeno correspondió a una erupción del volcán nevado del Ruíz.

*Committee on Natural Disasters, Division of Natural Hazard Mitigation, National Research Council (1987)* citando a Acosta (1846) hace referencia a un evento sísmico de gran magnitud ocurrido en febrero 19 de 1845, que fue seguido por un intenso flujo de lodo y grandes fragmentos de hielo que descendieron a través del río Lagunillas inundando rápidamente sus valles y matando aproximadamente a 1000 personas que permanecían en las proximidades del valle superior de este afluente [9][10]. Según Acosta (1846), los flujos de lodo que descendieron por el río Lagunillas este día pudieron ser incluso más voluminosos que los presentados en noviembre de 1985 [9].

A principios de 1984, se observó actividad sísmica y fumarólica en las proximidades al cráter Arenas. Un aumento de la actividad sísmica en septiembre de 1985 culminó en una erupción freática el día 11 de ese mismo mes,

provocando una considerable emisión de cenizas que alcanzó incluso a la que hoy es la ciudad de Pereira y un pequeño flujo de escombros que avanzó por la parte superior del río Azufrado [9]. El 13 de noviembre de 1985, 60 millones de metros cúbicos de lodo destruyeron el pueblo de Armero cobrando la vida de unas 25000 personas, a causa de la tercera erupción más catastrófica ocurrida desde 1800 después de la erupción del monte Tambora (1915) y del volcán Krakatoa (1883) que dejaron alrededor de 56000 y 36400 víctimas mortales respectivamente.[11]

De acuerdo con la información publicada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en su página web, después de lo acontecido en noviembre de 1985, se presentó emisión de cenizas los días 4, 5 y 6 de enero y 20 y 29 de julio de 1986. También en los días del 9 al 11 de junio de 1987 y del 22 al 25 de marzo de 1988. Además, hacen mención de una erupción freato-magmática ocurrida el 1 de septiembre de 1989 [1], que con cinco explosiones, emisión de ceniza y gases, irrumpieron la calma de 400 mil habitantes de los 13 municipios de la zona de influencia del VNR. Se dice que aquella gruesa columna de humo negro que surgió del cráter, se elevó hasta los 16 mil pies de altura [12].

De la década de los 90's poco se tiene información, pero se sabe que existieron una serie de eventos de carácter sísmico en 1994 que pudieron guardar relación con una erupción del VNR, sin embargo, esta información sigue siendo incierta [1][3]. En 1995 se registraron temblores, pero no representaron más que una alerta para las zonas aledañas al volcán [13].

La siguiente tabla resume el comportamiento que ha presentado el VNR en el periodo comprendido entre Marzo de 2006 y Noviembre de 2013, tomando como referencia el nivel de actividad, la actividad sísmica y novedades presentadas. (Información tomada de [1]).

**Tabla 1.** Resumen de novedades en boletines mensuales del SGC (2006 – 2013)

<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>NIVEL DE ACTIVIDAD</b>	<b>CANTIDAD SISMOS</b>	<b>NOVEDADES</b>
2006	Marzo	IV	647	En general, la actividad sísmica que presentó el VNR en los meses del año 2006 fue baja y la presencia de una columna de vapor relacionada con la actividad fumarólica en el cráter fue constante. Esta presentaba en la mayoría de casos, color blanco a gris claro y su altura máxima osciló entre 100 y 600 m
	Abril	IV	399	
	Mayo	IV	264	
	Junio	IV	296	
	Julio	IV	299	
	Agosto	IV	278	
	Septiembre	IV	212	
	Octubre	IV	408	
	Noviembre	IV	217	
	Diciembre	IV	290	
2007	Enero	IV	240	En general, la actividad sísmica que presentó el VNR en los meses del año 2007 fue similar a la presentada en los meses del año 2006 y la presencia de una columna de vapor relacionada con la actividad fumarólica en el cráter fue constante. Esta presentaba color blanco y su altura máxima osciló entre 100 y 850 metros.
	Febrero	IV	236	
	Marzo	IV	203	
	Abril	IV	208	
	Mayo	IV	275	
	Junio	IV	112	
	Julio	IV	177	
	Agosto	IV	129	
	Septiembre	IV	281	
	Octubre	IV	334	
	Noviembre	IV	278	
	Diciembre	IV	614	
2008	Enero	IV	349	En general, la actividad sísmica que presentó el VNR en los meses del año 2008 fue baja y la presencia de una columna de vapor relacionada con la actividad fumarólica en el cráter fue constante. Esta presentaba color blanco y su altura máxima osciló entre 150 y 600 metros.
	Febrero	IV	246	
	Marzo	IV	236	
	Abril	IV	175	
	Mayo	IV	177	
	Junio	IV	169	
	Julio	IV	153	
	Agosto	IV	232	
	Septiembre	IV	264	
	Octubre	IV	225	
	Noviembre	IV	288	
	Diciembre	IV	277	

2009	Enero	IV	341	En general, la actividad sísmica que presentó el VNR en los meses del año 2009 fue baja y la presencia de una columna de vapor relacionada con la actividad fumarólica en el cráter fue constante. Esta presentaba color blanco y su altura máxima osciló entre 50 y 800 metros.
	Febrero	IV	343	
	Marzo	IV	335	
	Abril	IV	387	
	Mayo	IV	383	
	Junio	IV	270	
	Julio	IV	230	
	Agosto	IV	357	
	Septiembre	IV	261	
	Octubre	IV	298	
	Noviembre	IV	400	
	Diciembre	IV	447	
2010	Enero	IV	348	n/a
	Febrero	IV	383	n/a
	Marzo	IV	188	n/a
	Abril	IV	326	n/a
	Mayo	IV	247	n/a
	Junio	IV	200	n/a
	Julio	IV	217	n/a
	Agosto	IV	253	n/a
	Septiembre	III	1172	El nivel de actividad cambió de Verde (IV) a Amarillo (III) el día 30 de septiembre debido al incremento de la actividad sísmica presentado.
	Octubre	III	4643	n/a
Noviembre	III	3342	n/a	
Diciembre	III	986	n/a	
2011	Enero	III	2786	n/a
	Febrero	III	2450	n/a
	Marzo	III	2778	n/a
	Abril	III	1743	n/a
	Mayo	III	2062	n/a
	Junio	III	1114	n/a
	Julio	III	1182	n/a
	Agosto	III	1111	n/a
	Septiembre	III	1727	n/a
	Octubre	III	1243	n/a
	Noviembre	III	1071	n/a
	Diciembre	III	1208	n/a
2012	Enero	III	850	n/a
	Febrero	III	4052	Leve incremento actividad sísmica.

2012	Marzo	II	11727	El nivel de actividad cambió de Amarillo (III) a Naranja (II) el día 31 de Marzo debido al incremento de la actividad sísmica con respecto a meses anteriores.
	Abril	II	19392	Aumento considerable de sismos por día, exceptuando algunos días en los que predominó la calma. Se registran procesos de emisión de ceniza los días 16 y 19 de Abril.
	Mayo	II	3024	El nivel de actividad cambió de Naranja (II) a Amarillo (III) el día 03 de Mayo y de Amarillo (III) a Naranja (II) debido a la abundante emisión de cenizas del día 29 de Mayo. Se reportó caída de ceniza en algunos municipios de los departamentos de Caldas, Risaralda, Antioquia y norte del Valle del Cauca. Otros eventos de emisión de ceniza, no tan significativos se presentaron los días 10 y 22 de mayo.
	Junio	I	754	El nivel de actividad cambió de Naranja (II) a Rojo (I) el día 30 de Junio. Ver <b>Nota 1</b> .
	Julio	II	754	Fue constante el registro de señales sísmicas de tremor volcánico durante el mes. Se reportó caída de cenizas en Chinchiná, Villamaría y Manizales durante el mes.
	Agosto	II	1086	La actividad fumarólica mostró en general un color blanco asociado a vapor de agua y ocasionalmente mostró un color gris asociado con emisiones de ceniza
	Septiembre	III	2619	El nivel de actividad cambió de Naranja (II) a Amarillo (III) el día 05 de Septiembre.
	Octubre	III	2884	n/a
	Noviembre	III	5623	n/a
	Diciembre	III	823	n/a

2013	Enero	III	1111	n/a
	Febrero	III	2513	n/a
	Marzo	III	2260	n/a
	Abril	III	>10000	n/a
	Mayo	III	>6700	Se destacan algunas emisiones de ceniza los días 22 y 25 de mayo.
	Junio	III	1527	n/a
	Julio	III	1288	Se destaca una pequeña emisión de ceniza el día 11 de Julio
	Agosto	III	4977	n/a
	Septiembre	III	5081	n/a
	Octubre	III	22842	Importante incremento en la actividad sísmica. Sismo de 4,4 (ML) ocurrido el 06 de Octubre.
	Noviembre	III	8174	n/a
	Diciembre	III	-	-

**Nota 1.** Las señales sísmicas de Tremor volcánico estuvieron asociadas a explosiones y emisiones de gases y ceniza que se presentaron de manera constante durante todo el mes. La columna de gases que motivó el cambio en el nivel de actividad el 30 de Junio, alcanzó una altura de aproximadamente 8000 m sobre la cima del volcán. Dicha columna presentó un color gris oscuro y una dispersión preferencial hacia el occidente y suroccidente del volcán, de donde se recibieron reportes de caída de ceniza en los sectores cercanos, así como en los municipios de Chinchiná, Santa Rosa de Cabal, Pereira, Mistrató, Apía, Santuario y Palestina. Cabe resaltar que casi en la totalidad del mes, el nivel de actividad se mantuvo en Naranja (II) [1] [14].

**Nota 2.** Con respecto al significado de los niveles de actividad [1]:

- ✓ En el **nivel Verde de actividad (IV): Volcán activo y comportamiento estable**, el volcán puede estar en un estado base que caracteriza el periodo de reposo o quietud, o registrar actividad sísmica, fumarólica u otras manifestaciones de actividad en superficie que afectan fundamentalmente la zona más inmediata o próxima al centro de emisión, por lo que no representa riesgo para las poblaciones y actividades económicas de su zona de influencia.
- ✓ En el **nivel Amarillo de actividad (III): Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica**, las variaciones en los niveles de los parámetros derivados de la vigilancia indican que el volcán está por encima del umbral base y que el proceso es inestable pudiendo evolucionar aumentando o disminuyendo los niveles. Pueden registrarse fenómenos como enjambres de sismos, algunos de ellos sentidos; emisiones de ceniza; lahares; cambios morfológicos; ruidos; olores de gases volcánicos, entre otros, que

pueden alterar la calidad de vida de las poblaciones en la zona de influencia volcánica.

- ✓ En el **nivel Naranja de actividad (II): Erupción probable en término de días o semanas**, se presentan variaciones significativas en el desarrollo del proceso volcánico derivadas del análisis de los indicadores de los parámetros de vigilancia, las cuales pueden evolucionar en evento(s) eruptivo(s) de carácter explosivo o efusivo.
- ✓ En el **Nivel Rojo de actividad (I): Erupción inminente o en curso**, se presenta un proceso eruptivo en curso cuyo clímax se puede alcanzar en horas o un evento eruptivo en curso. La fase eruptiva sea explosiva o efusiva puede estar compuesta de varios episodios. El tiempo de preparación y respuesta es muy corto.

## 4.2. CENIZAS VOLCÁNICAS

### 4.2.1. Generalidades

La ceniza volcánica es un tipo de material piroclástico que forma parte de la “tefra” (conjunto de material volcánico que es emitido por un volcán en el momento de la erupción) siendo resultado del cuarteo y la separación de la roca volcánica en partículas diminutas que están presentes en los gases emitidos por los volcanes y que pueden ser transportadas por las corrientes de aire con gran facilidad debido a su pequeño tamaño, afectando una gran área de tierra, como las zonas naturales que los rodean y en algunos casos las áreas urbanas; la ceniza volcánica también puede ser definida como: “... es una composición de roca y mineral muy finas (de menos de 2mm de diámetro) que son eyectadas por un viento volcánico...”. [15]

### 4.2.2. Composición

La composición química de las cenizas varía respecto a las propiedades del suelo que las rodea, así como se observa en el reporte emitido por el profesor de la Universidad Nacional de Córdoba, Dr. Raúl A. Montenegro hacia el gobierno argentino, el cual realiza un comparativo entre la composición química de la ceniza propias de los volcanes Eyjafjallajökull (Islandia), Puyehue (Chile) y Chaité (Chile), encontrándose una variación notable de los componentes mayoritarios estudiados que son: Dióxido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), Trióxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Óxido de hierro ( $\text{FeO}$ ), Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), Óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), Óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), Dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Óxido de manganeso ( $\text{MnO}$ ), Óxido de cloro ( $\text{Cl}_2\text{O}$ ), Trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y sus trazas elementales como: Circonio (Zr), Bario (Ba), Estroncio (Sr), Zinc (Zn),

Vanadio (V), Iodo (Y), Cromo (Cr), Lantano (La), Cobre (Cu), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Escandio (Sc). [16].

#### **4.2.2.1. Arsénico**

El arsénico es un elemento perteneciente a la familia de los metaloides (elementos con características metálicas y no metálicas); se encuentra de forma natural, principalmente en sales de sulfuro junto con otros minerales que contienen cobre, plomo, hierro, níquel, cobalto. El arsénico es un buen conductor térmico, pero no conduce muy bien la electricidad y por lo general es usado para la construcción de semiconductores como el arseniuro de galio, la fabricación de fuegos artificiales, la producción de armas, etc. Este elemento se encuentra de tres (3) formas alotrópicas: gris o metálico, amarillo y negro. Cada alótropo hace que su conductividad térmica aumente, disminuya o sea intermedia (respectivamente) y su abundancia en la naturaleza depende de su extracción de la misma. [17]

El arsénico (As) es un elemento extremadamente tóxico y peligroso para la salud de la mayor cantidad de seres vivos en el planeta, porque es capaz de ocasionar alteraciones en el organismo debido a su efecto carcinógeno, además produce enfermedades cardiovasculares, gastrointestinales y afecciones en el sistema nervioso. La organización mundial de la salud (OMS) en compañía del Environmental Protection Agency (EPA) establecieron que la máxima concentración admisible para el consumo del agua tratada es de 10 µg/L, valor que también se encuentra en la resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la protección social en su quinto (5to) artículo donde se especifican las características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana [18].

El Arsénico puede encontrarse en compuestos orgánicos o inorgánicos; en el agua por ejemplo, prevalece una mayor concentración de sustancias inorgánicas porque poseen mayor solubilidad en ella, entre estas están diferentes especies de arseniato ( $\text{As}^{5+}$ ) y arsenito ( $\text{As}^{3+}$ ). Cuando el pH ambiental se encuentra en valores relativos entre 4 y 10, la especie dominante es el As ( $5+$ ), que genera especies negativamente cargadas ( $\text{H}_2\text{AsO}_4$  y  $\text{HAsO}_4^{-2}$ ), mientras que las especies dominadas con el  $\text{As}^{3+}$  no tienen carga ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ). [19]

#### **4.2.2.2. Cadmio**

El Cadmio es un elemento que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre, por lo general está altamente ligado al zinc cuando se extrae industrialmente de minerales con estas características. Los minerales con mayor concentración de cadmio son la Blenda de cadmio ( $\text{CdS}$ ), la Otavita ( $\text{CdCO}_3$ ) y la Monteponita ( $\text{CdO}$ ). El cadmio es un elemento de brillo metálico de color blanco,

maleable y su conductividad eléctrica es 3 veces menor a la del cobre. El cadmio, por lo general, es utilizado para la fabricación de baterías, evita la corrosión del hierro, la creación de aleaciones para la industria automotriz, pigmento, estabilizador del plástico en las tuberías de PVC, entre otros. [20]

El Cadmio (Cd) pertenece a la familia de los metales pesados, los cuales se clasifican como elementos de alta peligrosidad para la salud humana porque no son fácilmente eliminados por el organismo una vez entran por ingestión o inhalación, produciendo enfermedades respiratorias y/o renales que son capaces de obstruir el sistema de filtración de los riñones, causando la excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo. Las patologías características de la acumulación de este metal en el organismo son diarrea, dolor de estómago y vómitos severos, fractura de huesos, fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, daño al sistema nervioso central, daño al sistema inmune, desórdenes psicológicos, posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer [21]. Teniendo en cuenta la normatividad colombiana, la resolución No. 2115 del año 2007 establece en su artículo N°5 que las concentraciones permisibles para el Cd en el agua para consumo es de 0,003 mg/L.

#### **4.2.2.3. Cobre**

El cobre ha sido uno de los elementos más utilizados para el desarrollo de diferentes utensilios de uso cotidiano a lo largo de los siglos. Se encuentra de forma mineral en la corteza terrestre en forma de sulfuros (calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ), calcopirita ( $\text{FeCuS}_2$ ) bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y óxidos del mismo tales como cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y melaconita ( $\text{CuO}$ ). Los minerales carbonatados (azurita y malaquita) representan un problema de minería debido a que alteran a los compuestos sulfurados. [20]

El cobre en su estado fundamental es un elemento de color rojizo con brillo metálico, de alta conductividad eléctrica y térmica, maleable, lo cual permite su uso en cableado eléctrico y desarrollo de aparatos eléctricos, electrónicos; también se han creado herramientas para el uso diario como ollas, joyería, etc. De igual forma se pueden encontrar pequeñas concentraciones de cobre en los alimentos, produciendo una tolerancia de por lo menos 1,0 mg Cu/L en la dieta diaria en los organismos y, sin embargo, cuando este es ingerido en exceso, puede ocasionar cambios significativos en el cuerpo humano, por ejemplo, daños en los riñones e hígado de los niños de forma irreparable y en la población adulta genera trastornos intestinales como diarreas, vómito, calambres estomacales, entre otros [22]. El valor de concentración máxima de cobre en agua para consumo humano establecido por la Environmental Protection Agency (EPA) es de 1,3 mg /L, sin embargo, la normatividad colombiana en la resolución No. 2115 del 2007, emitida por el ministerio de la protección social de Colombia, indica que la concentración máxima admisible del metal cobre en el agua para consumo

humano es de 1,0 mg/ L, lo cual hace de esta resolución más estricta en cuanto a este parámetro.

#### **4.2.2.4. Cromo**

El cromo es un metal de transición que se genera de forma natural y se encuentra en rocas, tierra, polvo y gases volcánicos, esto hace que se pueda encontrar este metal en diversos estados de oxidación que se caracterizan por las diferentes coloraciones en las que se presentan debido a los complejos químicos que forman. El cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) es el estado de oxidación predominante en los organismos vivos, mientras que el cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) y el cromo en estado fundamental ( $\text{Cr}^0$ ) son especies que se obtienen por lo general en procesos industriales. El cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) es un elemento residual necesario para mantener una buena condición de salud, ya que ayuda al cuerpo a emplear los azúcares, grasas y las proteínas en sus procesos biológicos. [23]

El cromo es un metal duro, frágil, de color gris acerado y de brillo metálico. Por lo general se producen aleaciones de cromo para la industria automotriz, de alimentos, tuberías, entre otros, en las que son de común utilidad por su alta resistencia a la corrosión

Este metal es quizás uno de los metales que más puede generar alteraciones sobre la salud humana, una de ellas y quizás la más común es el cáncer; este se manifiesta según la forma en que haya sido introducido al organismo (vía respiratoria o ingerida, entre otros), ocasionando cáncer de pulmón, estómago, riñones, leucemia, etc. Varios estudios han demostrado que el cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) es el causante de todos estos tipos de cáncer, especialmente a personas que están severamente expuestas a él (industria textil o metalmeccánica). Adicional a esto, se han comprobado otras manifestaciones sobre la salud acerca del cromo hexavalente como erupciones cutáneas, malestar de estómago y úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, entre otras. [20]

#### **4.2.2.5. Magnesio**

El magnesio es el metal más ligero conocido por la industria del metal; es de color blanco plateado, medianamente fuerte, se lustra con el roce suave, no necesita almacenamientos especiales libres de oxígeno ya que permanece cubierto con una fina capa de óxido, impermeable y de difícil limpieza.

Es muy abundante en la naturaleza, y se halla en cantidades importantes en muchos minerales rocosos, como la Dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), Forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), Liebenbergita ( $(\text{Ni},\text{Mg})_2\text{SiO}_4$ ) y serpentina. Además se encuentra en el agua de mar, salmueras subterráneas y lechos salinos. Es el

tercer metal estructural más abundante en la corteza terrestre, superado solamente por el aluminio y el hierro [20]

Según estudios relacionados con el magnesio (Mg), este elemento es considerado de baja peligrosidad en humanos y animales, además es un nutriente esencial para la fotosíntesis de las plantas, es un componente básico de la clorofila (sustancia encargada de otorgarle el color verde a las hojas), etc [24]. Sin embargo, existen sustancias de magnesio capaces de causar síntomas temporales en el organismo, como fiebre, vómito, dolores musculares, náuseas, entre otras.

Para el medio ambiente, el magnesio no representa peligro aparente, pues como ya está mencionado, es un componente importante para el suelo y su calidad. En el agua, el magnesio aporta al aumento de la dureza de la misma, porque aumenta la concentración de sales carbonatadas ( $\text{CO}_3^{3-}$ ), las cuales generan daños materiales a las industrias, electrodomésticos, y otros elementos de uso cotidiano. Se ha determinado que el consumo de aguas con bajas concentraciones de estas sales ayuda a la aparición de enfermedades cardíacas (principalmente en los hombres.) [20]

#### **4.2.2.6. Mercurio**

El mercurio es el único metal líquido a temperatura ambiente; posee una muy baja presión de vapor, factor que favorece su uso para la fabricación de utensilios que controle variables como la presión y la temperatura. Otro de los usos más comunes del mercurio es en la fabricación de amalgamas dentales y la fabricación de lámparas de mercurio.

Las fuentes de obtención de mercurio son de tipo natural, por lo general se encuentra en forma de sulfuro ( $\text{HgS}$ ), con frecuencia como rojo de cinabrio y con menos abundancia como metacinabrio negro. Un mineral menos común es el cloruro de mercurio (I). A veces los minerales de mercurio contienen gotas pequeñas de mercurio metálico. Donde este elemento se encuentra aislado y no tiene un contacto directo con el cuerpo. En los alimentos existe una leve concentración de mercurio porque muchas de las materias primas animales ingieren ciertas cantidades de este en forma mineral, producto de los fertilizantes en los suelos y en las aguas. [20]

Es uno de los elementos que más causan efectos tóxicos en la mayoría de los organismos vivos, principalmente por sus compuestos organometálicos tales como el metil mercurio ( $\text{MeHg}$ ) y el etil mercurio ( $\text{EtHg}$ ); esto se debe a la gran capacidad que tienen estos compuestos en reaccionar con algunos componentes del cuerpo, por lo que pueden generar sustancias mutagénicas. No obstante, existen especies inorgánicas del mercurio como el  $\text{Hg}^{2+}$  capaces de alojarse con

mayor facilidad en el agua, aumentando su concentración en las especies acuíferas que han tenido un contacto directo o indirecto con el mismo. [25]

#### 4.2.2.7. Níquel

El níquel es un mineral de gran demanda en la industria, principalmente para la obtención de aceros de gran calidad y en muchísimas aleaciones con Cobre, Cromo, Aluminio, Plomo, Cobalto, Manganeso, Plata y Oro. El níquel da a las aleaciones dureza, tenacidad y ligereza, así como cualidades anticorrosivas, eléctricas y térmicas. Este metal tiene numerosas aplicaciones para la creación de utensilios domésticos, monedas y otros.

Las fuentes de obtención de níquel, como muchos otros elementos, son de origen mineral y se extrae en muy poca cantidad. El níquel puede encontrarse en cantidades considerables en algunos alimentos como chocolates y grasas de origen vegetal; esto se debe a la facilidad con que este metal es captado en los suelos por introducción de productos de desecho industrial provenientes de procesos en los que el uso de este metal es imprescindible. [26]

Existen alrededor de ocho minerales de Níquel, pero las más comunes son la Garnierita ((Ni,Mg)<sub>6</sub>[(OH)<sub>8</sub>/Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>]) y la Pentlandita ((Ni,Fe)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>). Los minerales que se utilizan como fuentes de níquel, aparecen en tres formas: sulfuros, silicatos, mineral de hierro niquelífero. La Pentlandita, la cual contiene porcentajes variables de níquel y de Hierro (Ni - Fe) S, viene a constituirse en la fuente de casi todo el níquel producido de los minerales de Pirrotina y Calcopirita en los principales yacimientos del mundo. También se conocen la niquelina (níquel arsenical cuya fórmula es: NiAs) y la chloantita. [27]

Existen diferentes estudios sobre los efectos causados por la contaminación con Níquel (Ni). Estos demuestran que el Níquel genera grandes afecciones al organismo humano y el de los animales. Por lo general, el níquel tiene una baja solubilidad en agua; sin embargo, las sales de níquel son altamente solubles, haciendo que circulen a través de ella con gran facilidad. La concentración de estas sales varía respecto a la dureza en el agua, siendo estos dos factores directamente proporcionales, lo que implica que al aumentar la dureza, aumente la concentración de las sales de níquel y por tanto se genere bioacumulación en peces y demás especies acuíferas. A pH bajos, la solubilidad de los sulfatos, carbonatos, hidróxidos y ligandos orgánicos aumenta, siendo todas ellas sustancias de alta toxicidad carcinogénica y mutagénica [20]. Según la Resolución 2115 del 2007 establece que la concentración permitida para el Níquel en el agua para consumo humano es de 0,02 mg/L.

#### 4.2.2.8. Plomo

El plomo es un metal de color gris azulado, brillante en las superficies recientes, muy blando tan blando que se raya con la uña, muy maleable y es el menos tenaz de todos los metales; posee gran densidad y punto de fusión bajo, cristaliza en octaedros y deja en el papel una mancha gris. [28]

El Plomo es un metal blando que ha sido conocido a través de los años por muchas aplicaciones. Este ha sido usado ampliamente desde el 5000 antes de Cristo para aplicaciones en productos metálicos, cables y tuberías, pero también en pinturas y pesticidas. El plomo es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%). Las comidas como fruta, vegetales, carnes, granos, mariscos, refrescos y vino pueden contener cantidades significantes de Plomo. El humo de los cigarros también contiene pequeñas cantidades de plomo.

El Plomo puede causar varios efectos no deseados en los seres humanos, como son perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia; Incremento de la presión sanguínea; daño a los riñones, abortos y abortos sutiles; perturbación del sistema nervioso; daño al cerebro; disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma; disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños; perturbación en el comportamiento de los niños, como es agresión, comportamiento impulsivo e hipersensibilidad. [26]

El pH juega un papel importante en las variaciones de la concentración de plomo (Pb) en el agua para consumo humano; porque la solubilidad de los compuestos presentes en las tuberías que distribuyen el agua por toda la red aumenta considerablemente a valores de pH bajos, formando compuestos producto de la corrosión ácida como Cerusita ( $PbCO_3$ ), Hidrocerusita ( $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ ), plumbonacrita ( $Pb_{10}(CO_3)_2(OH)_6O$ ), litharge (PbO), y plattnerite ( $PbO_2$ ); la formación y estabilidad de estos compuestos de corrosión dependen de las características del agua que circula por las tuberías como el pH, alcalinidad, temperatura, concentración del cloro residual, oxígeno disuelto, cloruros, sulfatos, fosfatos y materia orgánica. [29]

#### 4.2.2.9. Potasio

El potasio es un elemento muy abundante y es el séptimo entre todos los elementos de la corteza terrestre; el 2.59% de ella corresponde a potasio en forma combinada. El agua de mar contiene 380 ppm, lo cual significa que el potasio es el sexto más abundante en solución. [20]

El potasio (K) es un mineral que se encuentra de distintas maneras en el planeta, éste forma parte esencial de la vida de muchas especies que allí habitan, entre ellos la especie humana. El potasio es un macronutriente del suelo al igual que el Nitrógeno (N) y el Fósforo (P), ayuda al crecimiento de las plantas silvestres y de consumo como las frutas, los vegetales y las plantas medicinales. El potasio es un elemento que no produce daño al medio ambiente cuando es liberado del suelo. Este elemento se encuentra en todos los seres vivos en forma de solución acuosa y catiónica ( $K^+$ ), ayudando al transporte del agua por todo el organismo y así evitar la deshidratación. El potasio no tiene efecto maléfico en el agua, pero le otorga un sabor salado a la misma cuando las concentraciones son relativamente altas; la principal causa del aumento en las concentraciones de potasio en el agua es la adición de cloruro de potasio (KCl) en las plantas de tratamiento como método para el ablandamiento del agua. [26]

El potasio en exceso afecta la regularidad del ritmo del corazón. Los riñones sanos conservan la cantidad adecuada de potasio en la sangre para que el corazón siga latiendo a un ritmo regular. Ingerir demasiado potasio puede ser muy peligroso para el corazón, puede incluso provocar la muerte. Existen casos en que el potasio crea un subproducto de desinfección en el agua altamente carcinógeno a partir del uso de ozono ( $O_3$ ) y aguas con altos contenidos de bromo, produciendo entonces el bromato de potasio ( $KBrO_3$ ), sustancia precursora del 8-oxoguanina (8-oxoG), compuesto que no codifica el ADN, generando entonces mutaciones en el organismo. [30]

#### **4.2.2.10. Sodio**

El sodio es un elemento químico de aspecto blanco plateado y pertenece al grupo de los metales alcalinos, su estado de agregación en su forma natural es sólido (no magnético). Este es un metal muy utilizado en la vida cotidiana; por lo general se utiliza para la producción de jabones, lámparas para las calles, la producción del cloruro de sodio (Sal de mesa), entre otros. El sodio ocupa el sexto lugar por su abundancia entre todos los elementos de la corteza terrestre, que contiene el 2.83% de sodio en sus formas combinadas. El sodio es, después del cloro, el segundo elemento más abundante en solución en el agua de mar. Las sales de sodio más importantes que se encuentran en la naturaleza son el cloruro de sodio (sal de roca), el carbonato de sodio (sosa y trona), el borato de sodio (bórax), el nitrato de sodio (nitrato de Chile) y el sulfato de sodio. Las sales de sodio se encuentran en el agua de mar, lagos salados, lagos alcalinos y manantiales minerales. [20]

El sodio es un elemento necesario para el control de la presión sanguínea en el cuerpo humano, siendo este indispensable para la vida; por lo general, el consumo de sodio está fuertemente relacionado con los problemas cardiovasculares, encontrándose que la cantidad ideal para el consumo de sodio en personas que

no padezcan de problemas cardiovasculares debe ser menor a 2300 mg/día y para personas que posean dicha afección debe ser de 1500 mg/día [31]. El sodio elemental no causa ningún efecto adverso al medio ambiente, sin embargo cuando este es disuelto por el agua, reacciona para originar el hidróxido de sodio (NaOH), siendo una sustancia capaz de aumentar el pH del agua gracias a su ion (OH<sup>-</sup>) en altas concentraciones, afectando la vida acuífera presente en el agua. Sin embargo, este hidróxido de sodio no se acumula en la naturaleza, se neutraliza con mucha facilidad en el agua y en el aire. [32]

#### **4.2.2.11. Zinc**

El zinc puro y pulido es de color blanco azulado, lustroso y moderadamente duro. El aire húmedo provoca su empañamiento superficial, haciendo que tenga color gris. El zinc puro es dúctil y maleable pudiéndose enrollar y tensar, pero cantidades pequeñas de otros metales como contaminantes pueden volverlo quebradizo. El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la Blenda, Marmatita o Esfalerita de Zinc (ZnS) y por lo general se encuentra ligada al cadmio. [26]

El zinc es el cuarto elemento más abundante dentro del cuerpo humano, es biológicamente esencial y ha sido encontrado en alrededor 300 enzimas y proteínas. Se han encontrado efectos adversos relacionando el déficit de este elemento con la disminución de las funciones inmunológicas y reproductivas, así como el deterioro cognitivo. Sin embargo, las concentraciones elevadas de zinc pueden ayudar al deterioro celular y puede ser un factor importante para la aparición del Alzheimer. [33] La contaminación por zinc no es de origen natural, es producido por los desechos de fábricas lo cual afecta en mayor parte el agua y el suelo. El zinc es un metal de fácil bioacumulación, encontrándose elevadas concentraciones de zinc en peces, animales y plantas. En el agua, el zinc disminuye el pH matando a gran parte del ecosistema; en el suelo, las elevadas concentraciones acaban con un alto número de plantas nativas y la fertilidad del suelo en que se encuentran. El zinc es perjudicial a los ganados y a los herbívoros que consumen de estas plantas ricas en este mineral [20]

### **4.3. GENERALIDADES DEL AGUA**

El agua es uno de los principales componentes del planeta tierra; alrededor del 98%, corresponde a agua salada que se encuentra en mares y océanos; el agua dulce que poseemos en un 69% corresponde a agua atrapada en glaciares y nieves, un 30% está constituida por aguas subterráneas y una cantidad no superior al 0,7% se encuentra en forma de ríos y lagos.

El agua es una molécula simple y extraña, puede ser considerada como el líquido de la vida. Es la sustancia más abundante en la biosfera, donde la encontramos en sus tres estados y es además el componente mayoritario de los seres vivos, pues entre el 65 y el 95% del peso de la mayor parte de las formas vivas es agua. El agua fue además el soporte donde surgió la vida. Posee un extraño comportamiento, que la convierte en una sustancia diferente a la mayoría de los líquidos, manifiesta extraordinarias propiedades físicas y químicas que van a ser responsables de su importancia biológica. Durante la evolución de la vida, los organismos se han adaptado al ambiente acuoso y han desarrollado sistemas que les permiten aprovechar las propiedades del agua. [34]

#### **4.3.1. Características de las fuentes comunes de agua**

- Pozos profundos: Normalmente son la mejor fuente de agua. Los problemas comunes que presentan son elevados niveles de hierro, manganeso y dureza.
- Pozos poco profundos: Cercanos a cursos de aguas superficiales; los acuíferos de arena actúan como un filtro efectivo en la remoción de materia orgánica y de microorganismos.
- Ríos: La calidad del agua depende del carácter de cuenca que drena, su grado de contaminación, la estación climática del año, y las condiciones climáticas diarias. Normalmente requiere el tratamiento más extenso y la mayor flexibilidad operacional que ninguna otra fuente.
- Lagos y embalses: La calidad del agua depende del tamaño, profundidad, clima, hoya, grado de eutrofización. Es una fuente de agua mejor que el río debido a que se facilita la auto purificación, en términos de reducción de turbidez, coliformes y color, además de la eliminación de grandes variaciones diarias en calidad. [34]

#### **4.3.2. Metales presentes en el agua**

Los metales presentes en el agua son diversos y generalmente contaminan los cuerpos de agua por la actividad humana, causando graves estragos al medio ambiente y a la población en general, disminuyendo la ya reducida cantidad de agua para consumo humano ya existente.

Las aguas procedentes de las industrias como la minería, la de recubrimientos metálicos, las fundidoras y otras más, contaminan el agua con diversos metales. Por ejemplo las sales de metales como el zinc, el mercurio, la plata y el cadmio son muy tóxicas para la flora y fauna terrestres y acuáticas.

Las sales solubles en agua de los metales pesados son muy tóxicas y acumulables por los organismos que las absorben, los cuales a su vez son fuente de contaminación de las cadenas alimenticias al ser ingeridos por uno de sus eslabones dentro de los cuales podría estar el hombre (procesos de bioacumulación y biomagnificación). [35]

#### 4.4. CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR CENIZAS VOLCÁNICAS

Foto tomada en el sector de La Romelia, Dosquebradas RDA.	Foto tomada en el sector la Guayana.	Foto tomada en el sector Río Claro.
Ruta Villamaría – La Telaraña – Sta. Rosa de Cabal		
		

**Figura 2.** Fotos que evidencian capacidad de desplazamiento de cenizas volcánicas (Junio, 2012). [1]

La ceniza volcánica no solo se deposita en el suelo, calles y cultivos; también afecta de forma directa las fuentes hídricas tales como ríos, lagos y reservas de agua natural [15] Por ello es necesario estudiar la composición físico-química y microbiológica de las aguas a potabilizar para no afectar su proceso de calidad cuando es distribuida a los consumidores. El efecto producido por la contaminación de las fuentes de agua con cenizas volcánicas tiene un alcance mayor a los 60 km de su fuente de emisión, alterando las propiedades organolépticas (color, olor y sabor), la turbiedad, la acidez y la concentración de sustancias y metales como Sodio, Hierro, Aluminio, Flúor Manganeseo, Sulfatos, Cloruros, entre otros [16]

##### 4.4.1. Turbiedad

La contaminación en el agua por efecto de la ceniza volcánica, involucra de forma directa la turbiedad, porque estas al alcanzar las fuentes de agua cruda o tratada, se deposita en la superficie, ocasionando que se presente un efecto barrera entre el desinfectante y la población bacteriana, además, hace que se presenten malos olores y otorga un sabor poco agradable al agua. [16]

#### **4.4.2. pH**

La ceniza volcánica se caracteriza por ser rica en compuestos que al entrar en contacto con el agua, produce sustancias como  $H_2SO_4$ , HCl y HF las cuales disminuyen notablemente el valor de pH aceptado para consumo humano, tal como lo ocurrido en el año 2000, cuando la erupción del volcán Copahue (Argentina) depositó entre 30 y 50 mm de ceniza volcánica dentro del lago Caviahue, generando la caída de este valor aproximadamente a 2.1[16], por ello hay que tener sumo cuidado en el momento de una emisión de ceniza, porque es capaz de alterar las condiciones del agua que se encuentre a 60 km de distancia del volcán emisor.

#### **4.4.3. Flúor**

La contaminación del agua debido a las altas concentraciones de flúor es una de las más peligrosas para la salud de los seres vivos y del medioambiente, esto se debe a que este elemento es altamente reactivo en el momento de ser ingerido o absorbido en concentraciones mayores a 10 ppm, siendo capaz de reaccionar con otros componentes químicos para crear sustancias cancerígenas como el perfluorooctano (sustancia utilizada en la industria como repelente de agua). Es de consideración que la ingestión de altas dosis de fluoruros produce un desgaste dental conocido con el nombre de Fluorosis. [36]

### **4.5. AFLUENTES INVOLUCRADOS EN PROYECTO**

#### **4.5.1. Río Campoalegre**

El río Campoalegre nace en el Nevado Santa Isabel a 4.600 m.s.n.m. y desemboca en el Río Cauca en el límite de los municipios de Chinchiná y Palestina a 870 m.s.n.m., luego de recorrer 72 km en dirección Suroriente – Noroccidente. Entre sus principales afluentes se encuentran los ríos Campoalegrito, San Eugenio y la quebrada La Estrella, los cuales conforman las tres subcuencas más importantes, que nacen en el territorio de Santa Rosa de Cabal, donde la cuenca ocupa un 59,69% del área de éste municipio, destacándose como la unidad hidrográfica más importante de esta entidad territorial al igual que en el municipio de Chinchiná donde esta cuenca ocupa el 52,53% de su territorio. La cuenca del Río Campoalegre abastece los acueductos de los municipios de Santa Rosa de Cabal (Risaralda), Palestina y Chinchiná (Caldas), presentándose como una cuenca de alta importancia a nivel regional generadora de energía eléctrica a través de la empresa CHEC. La cuenca del Río Campoalegre cuenta con 4 áreas naturales protegidas de orden Nacional, Regional y Municipal; la parte media y alta de la cuenca corresponde a la

formación de bosque muy húmedo montano bajo altamente intervenido para el establecimiento principalmente de pastos, mientras que en la parte media y baja predominan los cultivos limpios como café y pastos. [37]

El caudal promedio del Río Campoalegre es de 7.940 L/s, con máximos en abril y mayo (9.700 L/s en promedio) y octubre y Noviembre (10.100 L/s promedio), los mínimos se presentan en enero y agosto con 7.040 y 5.600 L/s, respectivamente. [38]

#### **4.5.2. Río Quindío**

El Río Quindío es el principal cuerpo de agua del departamento del Quindío, su cauce principal nace en el Nevado del Quindío (3780 m.s.n.m) al noreste del departamento. Inicialmente recibe como afluentes principales las quebradas: Cárdenas, Peligrosa, La Honda, San Pacho, El Bosque, Santa Rita, Boquía y La Víbora. Éste hace un recorrido desde su inicio de 65.35 km de longitud hasta su desembocadura a 1040 m.s.n.m. Entre los municipios de Salento y Armenia el Río Quindío recibe las aguas del Río Navarco, el cual tiene como afluentes el Río Boquerón y las quebradas: La Mina, Los Patos, Santa Librada y San Julián; las quebradas: Cusumbo, Chagualá, Castillo, La Duquesa, y La Florida (zona urbana de Armenia) desembocan directamente en el Río Quindío. En los límites con el departamento del Valle del Cauca (Caicedonia) recibe las aguas del río Barragán el cual nace en el sur del departamento en el páramo de Barragán, proyectándose desde allí hacia el norte. La convergencia de los ríos Quindío y Barragán da origen al río La Vieja. [39]

La cuenca del Río Quindío provee de agua a los acueductos municipales de Armenia, Circasia, Salento y La Tebaida, permitiendo el abastecimiento del vital líquido a aproximadamente 300.000 habitantes, que representan un 55% de la población quindiana. Además, la cuenca del Río Quindío es una zona de amortiguación que potencia, amplía y posibilita el funcionamiento ecológico del Parque Nacional Natural de los Nevados. [40]

#### **4.5.3. Río Otún**

El río Otún nace en el caño Alsacia, afluente de la Laguna del Otún, a una altura de 3980 msnm y desemboca en el río Cauca a los 875 msnm, en el flanco occidental de la Cordillera Central, aprovechando drenajes naturales superficiales y subterráneos de los nevados de Santa Isabel, Quindío y el páramo de Santa Rosa, localizados en el Parque Nacional Natural de los Nevados, en su trayectoria discurre por territorios de los municipios de Pereira, Santa Rosa de Cabal, Dosquebradas y Marsella. Es de vital prioridad para el municipio de Pereira pues es la única fuente utilizada como abastecedora de agua para los diferentes usos

de la zona, también lo es para un segmento mayoritario del municipio de Dosquebradas cuyo acueducto se abastece de este afluente. En su recorrido cruza la zona urbana del municipio de Pereira en sentido oriente-occidente, siendo a su vez el límite Norte de la ciudad y continúa hasta su desembocadura en el río Cauca a una altura de 875 m.s.n.m., en el sitio denominado Estación Pereira, después de un recorrido de 66 km. y un área de drenaje de 480,62 Km<sup>2</sup>. [41]

## **4.6. ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA**

### **4.6.1. Generalidades**

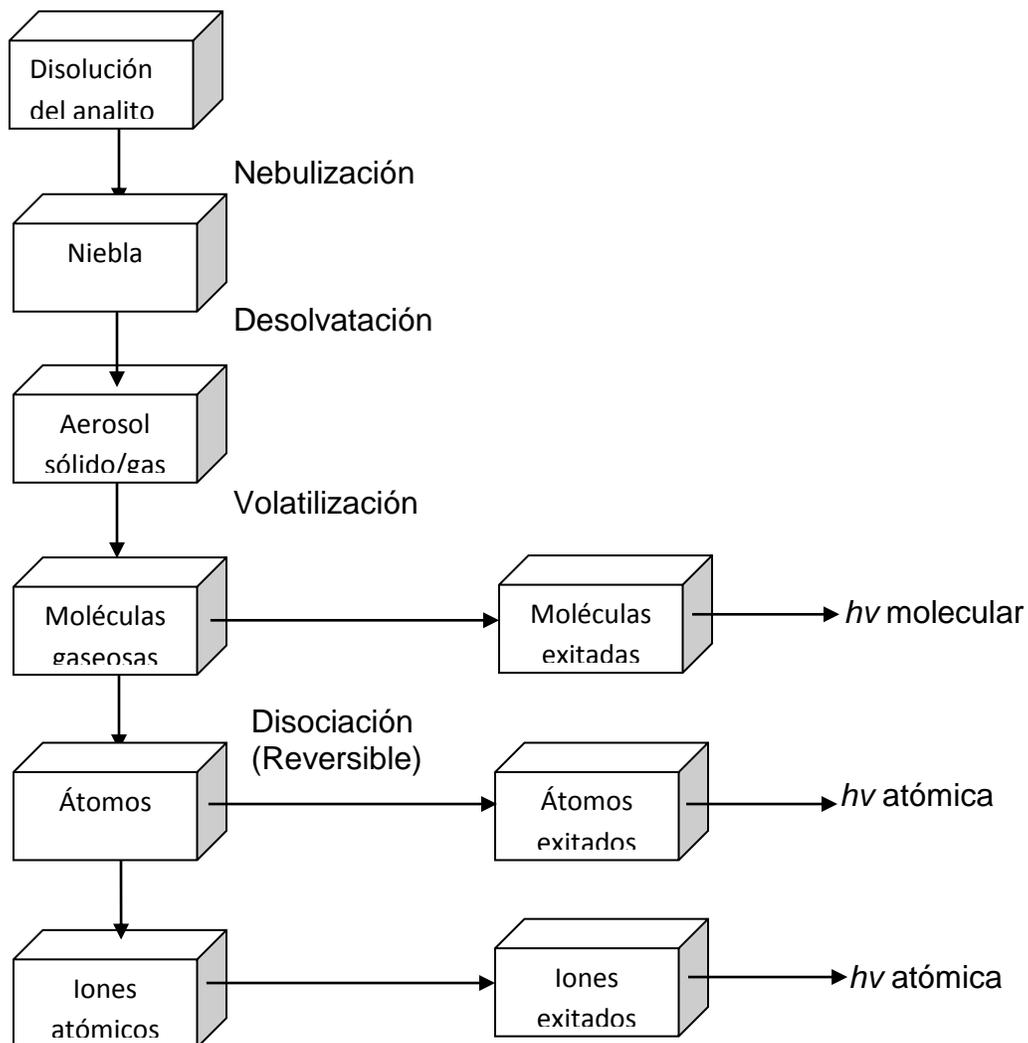
La espectroscopia de absorción atómica es una técnica cuya introducción al análisis químico es relativamente reciente. Arranca de 1955 con los trabajos del científico australiano A. Walsh y su comunicación titulada “Aplicación de la espectroscopia de absorción atómica al análisis químico”. Sin embargo, en otro aspecto, se podría decir que la absorción atómica ha sido conocida ya desde hace tiempo. Las líneas oscuras del espectro solar fueron observadas en la fecha ya lejana de 1802, y estudiadas por Joseph Fraunhofer en 1814, por lo que han sido denominadas “rayas de Fraunhofer”.

La espectroscopia de absorción atómica es un método para la detección y la determinación de elementos químicos, particularmente de elementos metálicos. Los compuestos, para su examen, se tienen que romper en los átomos que los constituyen. Ello se realiza por pulverización en una llama a alta temperatura. Un rayo luminoso de una cierta longitud de onda, producido por un tipo especial de lámpara, se dirige a lo largo del eje longitudinal de una llama plana y hacia un espectrofotómetro. Simultáneamente, la solución de la muestra es aspirada hacia el interior de la llama. Antes de entrar en ésta, la solución es dispersada formando una niebla de gotitas muy finas, que se evaporan en la llama dando inicialmente la sal seca y luego el vapor de la sal, el cual se disocia, por lo menos en parte, en átomos del elemento que se desea determinar [42]

### **4.6.2. Técnicas por espectrometría de absorción atómica.**

#### **4.6.2.1. Espectrometría de absorción atómica de llama.**

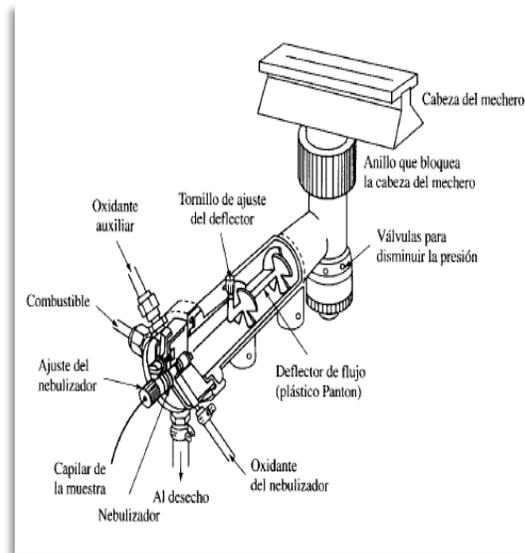
La espectrometría de absorción atómica (EAA) de llama es una técnica analítica-instrumental, que al igual que las otras técnicas, es capaz de cuantificar átomos en estado fundamental y gaseoso presentes en una matriz compleja. Esta utiliza una mezcla de gases (combustible-comburente) que permite generar la llama que sirve como medio de atomización de las muestras a la hora de su cuantificación.



**Figura 3.** Etapas de atomización de una muestra en EAA de llama. [43]

La espectrometría de absorción atómica de llama es una técnica capaz de analizar la cantidad de metales que encuentren dentro de una solución acuosa en el orden de partes por millón, haciéndola sencilla y de fácil aplicación dentro de la industria. Las muestras a analizar deben ser líquidas, incoloras, de baja viscosidad y no deben presentar materia orgánica. Ellas son introducidas al equipo en forma de aerosol por medio de un nebulizador con el fin de obtener una mayor superficie de contacto con la llama, el cual es transportado por una serie de deflectores que separan las gotas del aerosol más grandes de las más finas, haciendo que la cantidad de muestra utilizada para la lectura sea un 0,1% en comparación a la introducida al nebulizador; posteriormente el aerosol es mezclado con el gas

combustible y el gas oxidante con el fin de obtener una llama estable y la atomización de la muestra en sus diferentes etapas [43].



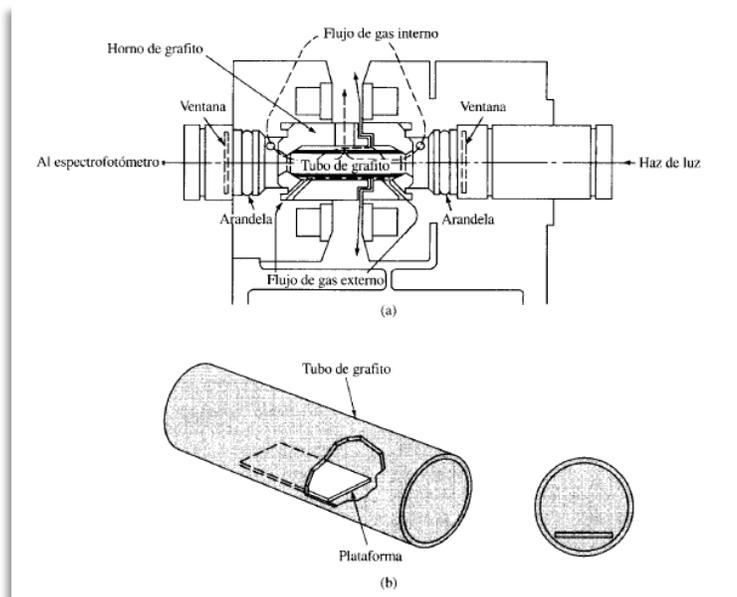
**Figura 4.** Ilustración de un atomizador para EAA de llama [43]

#### 4.6.2.2. Espectrometría de absorción atómica - Horno de grafito.

La espectrometría de absorción atómica por horno de grafito es la segunda técnica más utilizada por la industria; esta técnica utiliza un compartimiento especial que, al utilizar un horno de grafito y un arco eléctrico, eleva su temperatura en un rango de 2000°C – 3000°C. Cuando se utiliza el horno de grafito la muestra es 100% atomizada lo que produce una mayor sensibilidad de la técnica en comparación de la llama donde se atomiza el 0,1% de la muestra.

La técnica por horno de grafito permite el uso de una menor cantidad de muestra con un mínimo de desperdicios, además permite un mayor control de la temperatura y las fluctuaciones del camino óptico que son producidas por una llama; el horno de grafito al ser una técnica electrotérmica también elimina la presencia de luces no deseadas que son producidas por la combustión de otros gases dentro una llama. En comparación con la técnica de llama, el horno de grafito no necesita una transformación física de la muestra para ser inyectada en el equipo, solo es necesario una micro-pipeta. El horno de grafito tiene una longitud de aproximadamente 5 cm de longitud y 1 cm de diámetro el cual se encuentra rodeado de una camisa metálica y refrigerado por agua. Dentro el horno de grafito se deben introducir dos corrientes de gases inertes: una corriente externa y otra interna; la corriente externa ayuda desplazar todo el oxígeno

presente en el aire del ambiente y así evitar la calcinación del mismo, la otra corriente además de mantener un ambiente anaerobio, permite el desalojo de vapores producidos por la muestra durante las primeras etapas del calentamiento [43].



**Figura 5.** Ilustración del atomizador por horno de grafito [43]

Igual que la técnica de llama, la muestra a analizar pasa por una serie de procesos físicos para la atomización de la muestra, sin embargo al utilizar el horno de grafito, estos procesos se dan a diferentes temperaturas dentro del horno y no son mezcladas con el combustible como en la técnica de llama [44]

#### 4.6.2.3. Espectrometría de Absorción Atómica - Vapor Frío

El uso del vapor frío es una técnica de atomización única para la determinación de mercurio en una solución, esto se debe a que el mercurio es el único metal que posee una presión de vapor apreciable a temperatura ambiente, lo cual podría generar problemas de ionización del analito cuando se utilizan fuentes térmicas o electrotérmicas. La determinación de mercurio es de suma importancia debido a la alta toxicidad de sus compuestos órgano-metálicos y su amplia distribución en el medio ambiente.

Para la determinación de mercurio es necesario convertir todas las especies presentes dentro de la muestra a analizar en  $Hg^{2+}$  cuando son tratadas con una mezcla oxidante de ácido nítrico y ácido sulfúrico; posteriormente se reduce hasta

el mercurio elemental cuando se adiciona una solución de cloruro estañoso ( $\text{SnCl}_2$ ). Este mercurio elemental es conducido entonces a un tubo de absorción de camino óptico largo, burbujeando una corriente de gas inerte a través de la mezcla que le dio origen al mercurio elemental. La sensibilidad para la determinación de mercurio es en partes por billón (ppb) y a diferencia de las otras técnicas en absorción atómica, la atomización de las muestras no requiere un proceso térmico, sino uno totalmente químico [43]



**Figura 6.** Unidad vaporizadora de mercurio SHIMADZU MVU-1A

## **4.7. CONCEPTOS ESTADÍSTICOS**

### **4.7.1. Linealidad**

Se define como la relación lineal entre la señal y la concentración del analito. Para los métodos cuantitativos es necesario conocer el rango de concentraciones del analito o valores de la propiedad en que se basa el método sobre el cual el método puede ser aplicado. En el extremo inferior del rango de concentraciones, los factores limitantes son los límites de detección o cuantificación y en el extremo superior las limitaciones están dadas por las características de la respuesta del instrumento. Dentro del ámbito de trabajo generalmente existe un rango de respuesta lineal, dentro del cual habrá una relación lineal entre la señal y la concentración del analito o el valor de la propiedad que se mida [45].

### **4.7.2. Desviación estándar**

Se conoce como un parámetro de calidad de la precisión. La desviación estándar da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Se utiliza la siguiente fórmula.

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Donde:

$x_i$  = Dato analizado;  $\bar{x}$  = Promedio de la media de los datos;  $N$  = Número de medidas

#### 4.7.3. Límite de detección (LOD)

Cuando se realizan mediciones a niveles bajos del analito o de la propiedad relacionada, como en el análisis de trazas, es importante saber cuál es la concentración más baja del analito o el valor de su propiedad relacionada, que puede detectarse confiablemente por el método[46]. Normalmente el límite de detección se calcula de la siguiente manera:

$$\text{LOD} = 3,3 \text{ Sd} \text{ (del blanco ó muestra fortificada de baja concentración)}$$

El factor 3,3 es el valor del parámetro estadístico z para un nivel de confianza del 95% multiplicado por 2. El valor de Sd es el valor de desviación estándar dentro del grupo obtenido por raíz cuadrada del valor del cuadrado medio dentro. Se utiliza el valor de desviación estándar dentro del grupo, ya que se ha probado mediante el test F que no hay diferencias significativas entre lotes y dentro de lotes [45].

#### 4.7.4. Límite de Cuantificación (LOC)

Por definición, el límite de detección es la cantidad más pequeña del analito en una muestra que puede ser cuantitativamente determinada con exactitud aceptable. Es un parámetro del análisis cuantitativo para niveles bajos de compuestos en matrices de muestra y se usa particularmente para impurezas y productos de degradación. Se expresa como concentración del analito[47].

Generalmente se acuerda la cuantificación como la señal para una concentración igual a 10 veces la desviación estándar del blanco. Esto se llama el límite de la cuantificación o límite de la determinación, por ello: **LOC = 3,3 LOD** [48]

### 4.8. ASPECTOS LEGALES DE COMPARACIÓN

Las siguientes normas permitirán realizar comparaciones con el fin de entender la magnitud de las mediciones. Estas, por su criterio o lugar de aplicación, solo permiten llegar a conclusiones comparativas.

#### 4.8.1. Resolución 2115 de 2007

(Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano) [49]

Esta norma, emitida por el Ministerio de la protección social, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, presentan las concentraciones máximas aceptables en agua para el consumo humano, de algunos de los metales estudiados en el presente proyecto.

#### ARTÍCULO 5º. Características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.

**Tabla 2.** Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana

<b>Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias</b>	<b>Expresados como</b>	<b>Valor máximo aceptable (mg/L)</b>
Arsénico	As	0,01
Cadmio	Cd	0,003
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01

#### ARTÍCULO 6º. Características químicas de sustancias que tienen implicaciones sobre la salud humana.

**Tabla 3.** Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

<b>Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana.</b>	<b>Expresados como</b>	<b>Valor máximo aceptable (mg/L)</b>
Fluoruros	F <sup>-</sup>	1,0

**ARTÍCULO 7º. Características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana.**

**Tabla 4.** Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana

<b>Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana.</b>	<b>Expresados como</b>	<b>Valor máximo aceptable (mg/L)</b>
Magnesio	Mg	36
Zinc	Zn	3

**4.8.2. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life (Guía canadiense de la calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática)**

**Tabla 5.** Guía de calidad de los sedimentos para la protección de la vida acuática

<b>Nombre químico</b>	<b>Expresados como</b>	<b>ISQG/TEL (mg/100g)</b>	<b>PEL (mg/100g)</b>
Arsénico	As	0,59	1,7
Cadmio	Cd	0,06	0,35
Cobre	Cu	3,57	19,7
Cromo total	Cr	3,73	9,0
Magnesio	Mg	NE	NE
Mercurio	Hg	0,017	0,048
Níquel <sup>1</sup>	Ni	1,8	3,6
Plomo	Pb	3,5	9,13
Potasio	K	NE	NE
Sodio	Na	NE	NE
Zinc	Zn	12,3	31,5
Fluoruros	F <sup>-</sup>	NE	NE

Comparar las concentraciones de diversos contaminantes en muestras de sedimentos con estos valores de referencia, permitirá entonces obtener una idea básica del grado de contaminación y el posible impacto en la ecología [50].

<sup>1</sup> Estos valores fueron tomados de D. D. MacDonald, C. G. Ingersoll & T. A. Berger. (2000). Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems Gch. Environm. Contam. Toxicol. 39, 20-31

La guía canadiense de la calidad de sedimentos define los niveles de efecto umbral (Threshold Effect Levels – TELs) y los niveles de efecto probable (Probable effect Levels – PELs). Los TELs y PELs se utilizan para identificar los siguientes rangos de concentraciones químicas con respecto a los efectos biológicos que pueden causar:

- Si la concentración hallada está por debajo del TEL; se encuentra en el rango de efecto **mínimo** en el que rara vez ocurren efectos adversos en los ecosistemas acuáticos.
- Si la concentración hallada está entre el TEL y el PEL; se encuentra en el rango de efecto **posible** en el que de vez en cuando se presentan efectos adversos en los ecosistemas acuáticos.
- Si la concentración hallada está por encima del PEL; se encuentra en el rango de efecto **probable** en el que frecuentemente se presentan efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. MATERIALES

En la realización del presente proyecto se requirió la utilización de diferentes recursos tales como equipos de medición, material de laboratorio, material de muestreo, reactivos y laboratorios, que fueron suministrados por la Escuela de Química y el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### 5.1.1. Reactivos

- Agua desionizada
- Ácido Sulfúrico 98% Fisher Scientific
- Ácido Clorhídrico 37% Fisher Scientific
- Ácido Nítrico 98%
- Borohidruro de sodio
- Cloruro estañoso
- Cloruro de hidroxilamina
- Fluoruro de sodio
- Hidroxido de sodio en lentejas
- Permanganato de Potasio
- Solución estándar de Arsénico de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Cadmio de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Cobre de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Cromo de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Níquel de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Magnesio de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Mercurio de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Plomo de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Sodio de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Potasio de 1000 mg/L Scharlau
- Solución estándar de Zinc de 1000 mg/L Scharlau
- TISAB II

#### 5.1.2. Material de Vidrio

- Matraces de 50, 100, 200, 500 y 1000 mL
- Beakers de 250, 500 y 1000 mL
- Erlenmeyers de 125 y 250 mL
- Embudos tallo largo
- Bureta de 25 mL

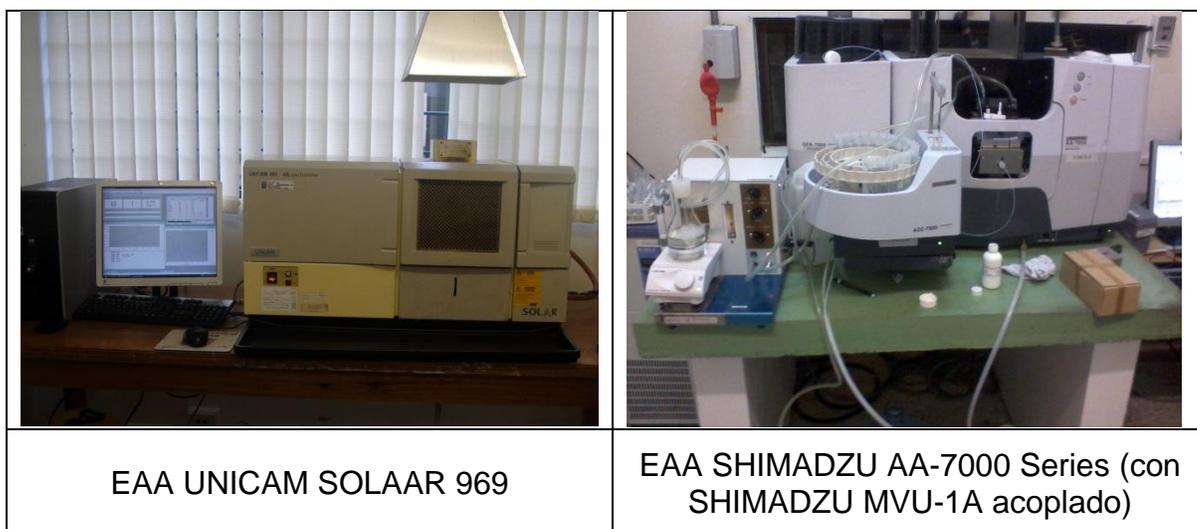
- Pipetas volumétricas de 3, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 mL
- Pipetas graduadas de 5 y 10 mL
- Vidrios reloj
- Varillas de agitación

### 5.1.3. Otros materiales

- Espátulas
- Frascos lavadores
- Frascos de polietileno de 1 y 2 L de capacidad
- Bolsas ZipLoc
- Tamizador de  $\text{Ø}0,1 \mu\text{m}$
- Estufa
- Planchas de calentamiento
- Baño de maría
- Papel filtro de  $\text{Ø}0,45 \mu\text{m}$
- Pera pipetadora
- Neveras de poliestireno

### 5.1.4. Equipos de medición

#### 5.1.4.1. Espectrofotómetro de absorción atómica y accesorios.



**Figura 7.** Equipos de espectrometría de absorción atómica utilizados.

Los equipos que se mencionan en la Tabla 2. corresponden a aquellos que más relevancia tuvieron en el desarrollo del presente estudio.

**Tabla 6.** Equipos de espectrometría de absorción atómica y accesorios utilizados

<b>EQUIPO</b>	<b>MARCA</b>	<b>UBICACIÓN</b>
Espectrofotómetro de absorción atómica	UNICAM SOLAAR 969	Escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira.
Espectrofotómetro de absorción atómica	SHIMADZU AA-7000 Series	Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica
Generador de hidruros	SHIMADZU HVG-1	Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica
Unidad vaporizadora de mercurio	SHIMADZU MVU-1A	Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica

#### 5.1.4.2. Nefelómetro (Turbidímetro)

Para realizar la cuantificación de la turbiedad de las muestras provenientes de los ríos Campoalegre y Quindío, se utilizó un nefelómetro marca HACH 2100 N de propiedad del Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.



**Figura 8.** Equipo para determinar turbiedad.

#### 5.1.4.3. Potenciómetro

En las mediciones de fluoruros realizadas a cada una de las muestras colectadas, se realizaron por medio de un medidor de ión selectivo (ISE) marca THERMO ORION 5 STAR, el cual funciona con un electrodo de ión selectivo para fluoruros marca THERMO ORION 9609BNW ION PLUS FLUORIDE.



**Figura 9.** Equipo para cuantificar fluoruros por ISE

#### 5.1.5. Muestras para el análisis

Las muestras de agua destinadas para los análisis fueron colectadas en los siguientes puntos:

- ✓ **Río Campoalegre**, Desarenador Campoalegre, Vereda El Jazmín, Santa Rosa de Cabal, Risaralda, N. 04° 55' 12.9" W. 075° 37' 24.8" Altura 1477
- ✓ **Río Quindío**, Puente, Vereda Boquía, Salento, Quindío.
- ✓ **Río Otún**, Planta de tratamiento Villa Santana, Pereira, Risaralda, N 04°48'3,82" W 75°39'52,31" Altura 1.504 msnm.



**Figura 10.** Desarenador Campoalegre (lateral izq. y sup. Derecha) y bocatoma Campoalegre (acueducto de Chinchiná y Pensilvania, Caldas).



**Figura 11.** Registro fotográfico de punto de muestreo (Río Quindío)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Obsérvese en la imagen inferior derecha, el puente de la vereda Boquía que sirve de vía de acceso hacia Salento, Quindío.



**Figura 12.** Registro fotográfico de puntos de muestreo dentro de la planta de tratamiento de Villa Santana<sup>3</sup>.

Para el caso de las muestra de sedimentos, los sitios de muestreo fueron los mismos, con excepción de la correspondiente al río Campoalegre, que fue obtenida de las orillas de un tramo de río de unos 30 metros en proximidades al desarenador que acá se referencia. La muestra de sedimentos del río Otún se obtuvo en los desarenadores primarios que se encuentran antes del lugar donde se disponen los químicos para el tratamiento del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Esta labor fue realizada durante un proceso de purga de los mencionados elementos.

## 5.2. METODOLOGIAS

### 5.2.1. Metodología de muestreo

Fueron realizadas diez (10) tomas puntuales de muestras de agua cruda en cada uno de los sitios, que fueron seleccionados con base en la susceptibilidad a contaminación por cenizas volcánicas que a los afluentes les genera su posición geográfica por su relativa cercanía al volcán en cuestión y al encontrarse dentro del rango de posible afectación por este tipo de contaminación según revisión histórica.

.

<sup>3</sup> De izquierda a derecha se encuentran: las válvulas que permitieron obtener los sedimentos, sitio pre-tratamiento químico donde se tomaron las muestras de agua y sedimentador que captaba los lodos que salían a través de las válvulas.

Cada muestreo de agua involucró la toma de una muestra destinada para la lectura de metales (Preservada con 5 mL de HNO<sub>3</sub> / Litro de muestra y cadena de frío) y otra para la lectura de la turbiedad y fluoruros (Preservada con cadena de frío únicamente); a dichas muestras se les asignó un código de distinción.

Para la toma de muestras de sedimentos sobre el río Quindío y Campoalegre, se realizaron pequeños recorridos por las orillas, extrayendo pequeñas cantidades de diferentes sitios, luego se procedió a juntar, mezclar y cuartear múltiples veces la muestra hasta obtener aproximadamente un kilogramo de esta.

El cronograma de muestreo se definió mediante la programación de fechas de manera aleatoria para cada uno de los ríos, eximiendo domingos y festivos.

**Tabla 7.** Cronograma de muestreos: Río Otún

MUESTRA	FECHA	CÓDIGO	
		METALES	FLUOR
1	16 /02/13	RP_MT_01	RP_FL_01
2	01/04/13	RP_MT_02	RP_FL_02
3	05/04/13	RP_MT_03	RP_FL_03
4	12/04/13	RP_MT_04	RP_FL_04
5	23/04/13	RP_MT_05	RP_FL_05
6	01/10/13	RP_MT_06	RP_FL_06
7	28/05/13	RP_MT_07	RP_FL_07
8	20/06/13	RP_MT_08	RP_FL_08
9	25/06/13	RP_MT_09	RP_FL_09
10	05/07/13	RP_MT_10	RP_FL_10
11	01/10/13	RP-S (Sedimentos)	

**Tabla 8.** Cronograma de muestreos: Río Quindío

MUESTRA	FECHA	CÓDIGO	
		METALES	FLUOR
1	18 /02/13	RQ_MT_01	RQ_FL_01
2	20/02/13	RQ_MT_02	RQ_FL_02
3	23/02/13	RQ_MT_03	RQ_FL_03
4	08/03/13	RQ_MT_04	RQ_FL_04
5	09/03/13	RQ_MT_05	RQ_FL_05
6	07/04/13	RQ_MT_06	RQ_FL_06
7	24/04/13	RQ_MT_07	RQ_FL_07
8	25/04/13	RQ_MT_08	RQ_FL_08
9	18/05/13	RQ_MT_09	RQ_FL_09
10	29/05/13	RQ_MT_10	RQ_FL_10
11	07/10/13	RQ-S (Sedimentos)	

**Tabla 9.** Cronograma de muestreos: Río Campoalegre

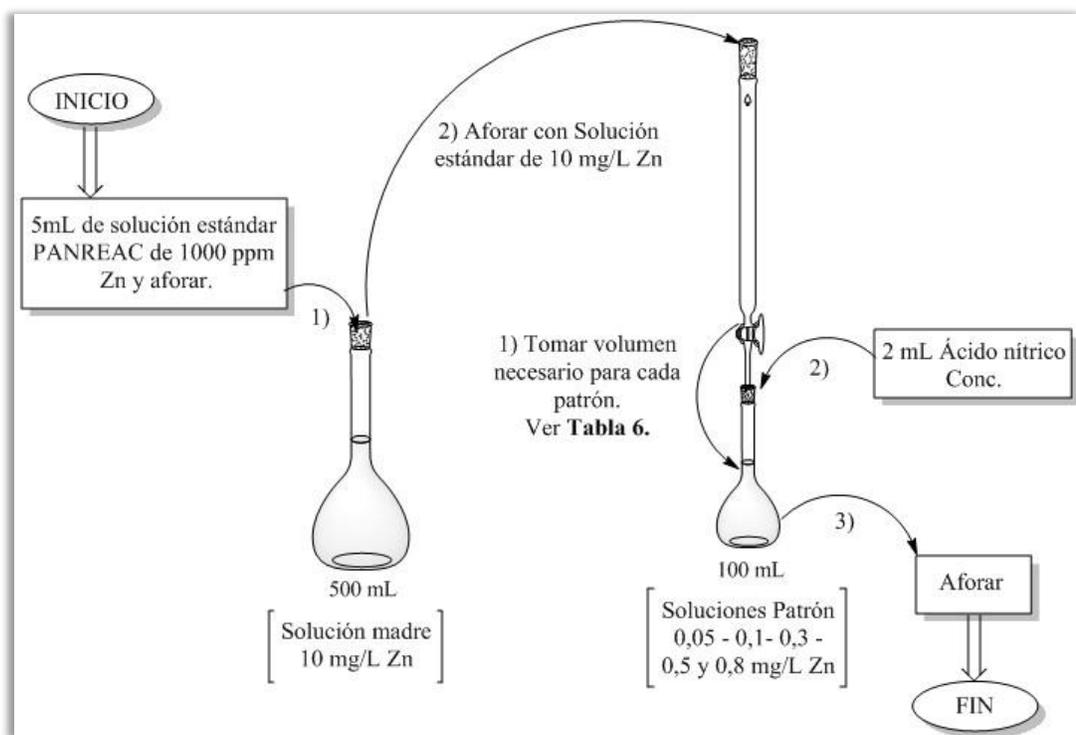
MUESTRA	FECHA	CÓDIGO	
		METALES	FLUOR
1	15/05/13	RC_MT_01	RC_FL_01
2	23/05/13	RC_MT_02	RC_FL_02
3	29/05/13	RC_MT_03	RC_FL_03
4	04/06/13	RC_MT_04	RC_FL_04
5	14/06/13	RC_MT_05	RC_FL_05
6	02/07/13	RC_MT_06	RC_FL_06
7	12/07/13	RC_MT_07	RC_FL_07
8	16/07/13	RC_MT_08	RC_FL_08
9	05/08/13	RC_MT_09	RC_FL_09
10	09/08/13	RC_MT_10	RC_FL_10
11	28/09/13	RC-S (Sedimentos)	

## 5.2.2. Metodología para la cuantificación de metales por espectrofotometría de absorción atómica.

### 5.2.2.1. Preparación de curvas de calibración

#### 5.2.2.1.1. Curva de calibración para Cadmio, Cobre, Cromo, Magnesio, Potasio, Sodio y Zinc.

Las curvas de calibración para estos metales se hacen de manera similar entre ellas, aunque difieren en las concentraciones de sus patrones, que se preparan considerando la concentración de cada metal en la matriz a analizar. Para efectos prácticos, lo que se muestra a continuación corresponde al procedimiento con el cual se preparó la curva de calibración de Zinc, que a su vez sirve como ejemplo ilustrativo de la manera como se preparan las curvas de calibración para los demás metales que en este punto se mencionan.



**Figura 13.** Procedimiento para la preparación de una curva de calibración para Zinc.<sup>4</sup>

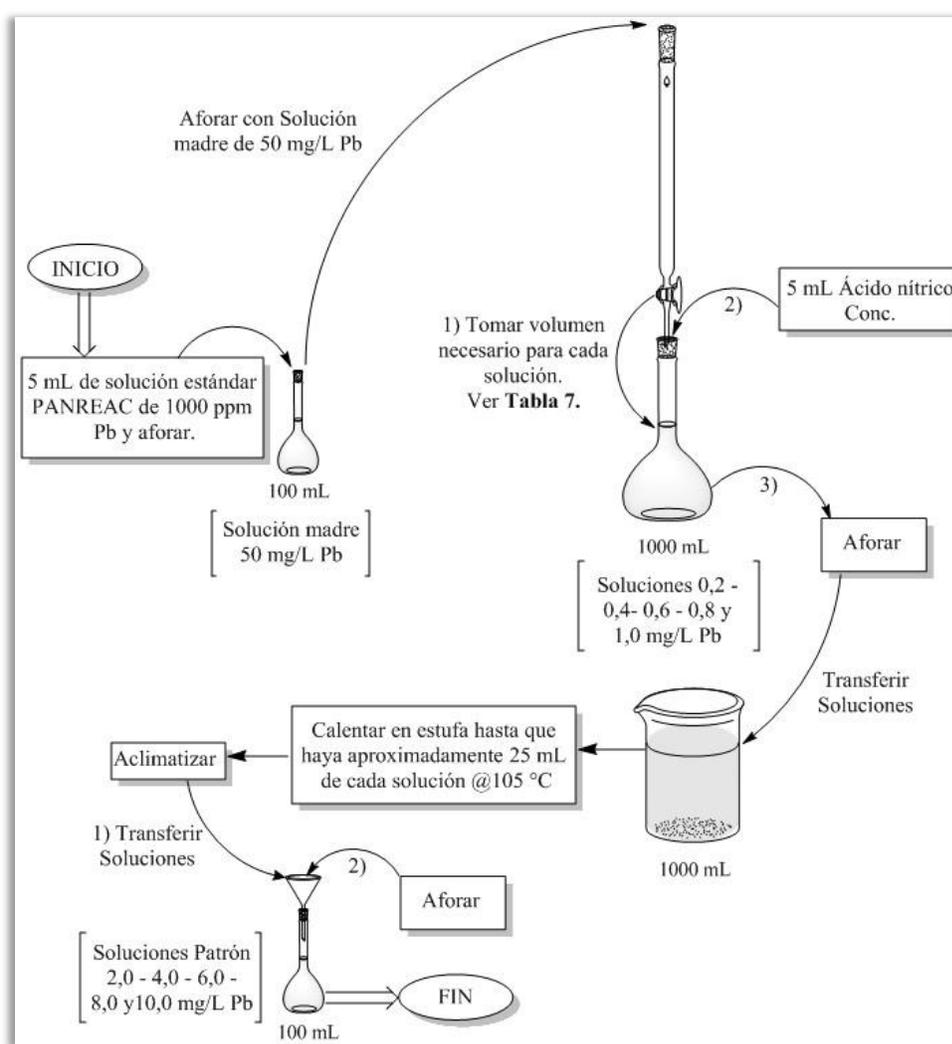
<sup>4</sup> Para cada aforo que se realice, debe utilizarse agua desionizada. El control se sirve de igual manera que los patrones.

**Tabla 10.** Preparación de patrones para los metales de 5.2.2.1.1, a partir de sus soluciones estándar de 10 mg/L

METAL		PATRÓN					CONTROL
		1	2	3	4	5	
CADMIO	Concentración (mg/L)	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	0,7
	Volumen solución madre (mL)	3	5	10	15	20	7
COBRE	Concentración (mg/L)	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	0,7
	Volumen solución madre (mL)	3	5	10	15	20	7
CROMO	Concentración (mg/L)	0,2	0,5	1	1,5	2	-
	Volumen solución madre (mL)	2	5	10	15	20	-
MAGNESIO	Concentración (mg/L)	0,05	0,1	0,3	0,5	1,0	0,7
	Volumen solución madre (mL)	0,5	1	3	5	10	7
POTASIO	Concentración (mg/L)	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	0,7
	Volumen solución madre (mL)	3	5	10	15	20	7
SODIO	Concentración (mg/L)	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	1,3
	Volumen solución madre (mL)	3	5	10	15	20	13
ZINC	Concentración (mg/L)	0,05	0,1	0,3	0,5	0,8	0,7
	Volumen solución madre (mL)	0,5	1	3	5	8	7

### 5.2.2.1.2. Curva de calibración para Níquel y Plomo (Método de concentración)

El siguiente ejemplo ilustra gráficamente la manera como se preparó una curva de calibración para plomo por el método de concentración, que corresponde a la misma metodología empleada en la preparación de la curva de calibración para Níquel. Estos dos metales requirieron la implementación de un método diferente al utilizado con la mayoría de metales analizados, debido a que su presencia en las diferentes muestras era tan baja que no lograba ser detectada por el Espectrofotómetro de Absorción Atómica de la Escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira.



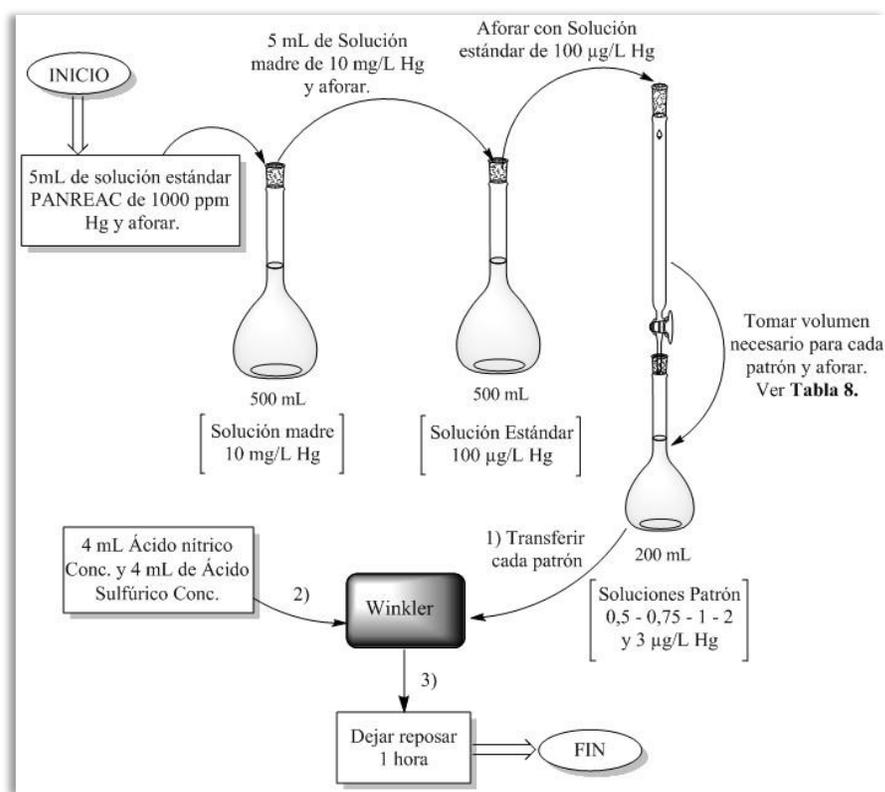
**Figura 14.** Procedimiento para la preparación curvas de calibración de Plomo<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Para cada aforo que se realice, debe utilizarse agua desionizada. El control se sirve de igual manera que los patrones.

**Tabla 11.** Preparación de patrones para curvas de calibración de Plomo y Níquel a partir de solución madre de 50 mg/L en Pb o Ni

Patrón	PLOMO		NÍQUEL	
	Concentración (mg/L)	Volumen de Solución madre (mL)	Concentración (mg/L)	Volumen de Solución madre (mL)
Blanco	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2,0	4,0	1,0	2,0
2	4,0	8,0	2,0	4,0
3	6,0	12,0	5,0	10,0
4	8,0	16,0	10,0	20,0
5	10,0	20,0	15,0	30,0
Control	2,5 / 8,0	5,0 / 16,0	2,5	5,0

### 5.2.2.1.3. Curva de calibración para Mercurio



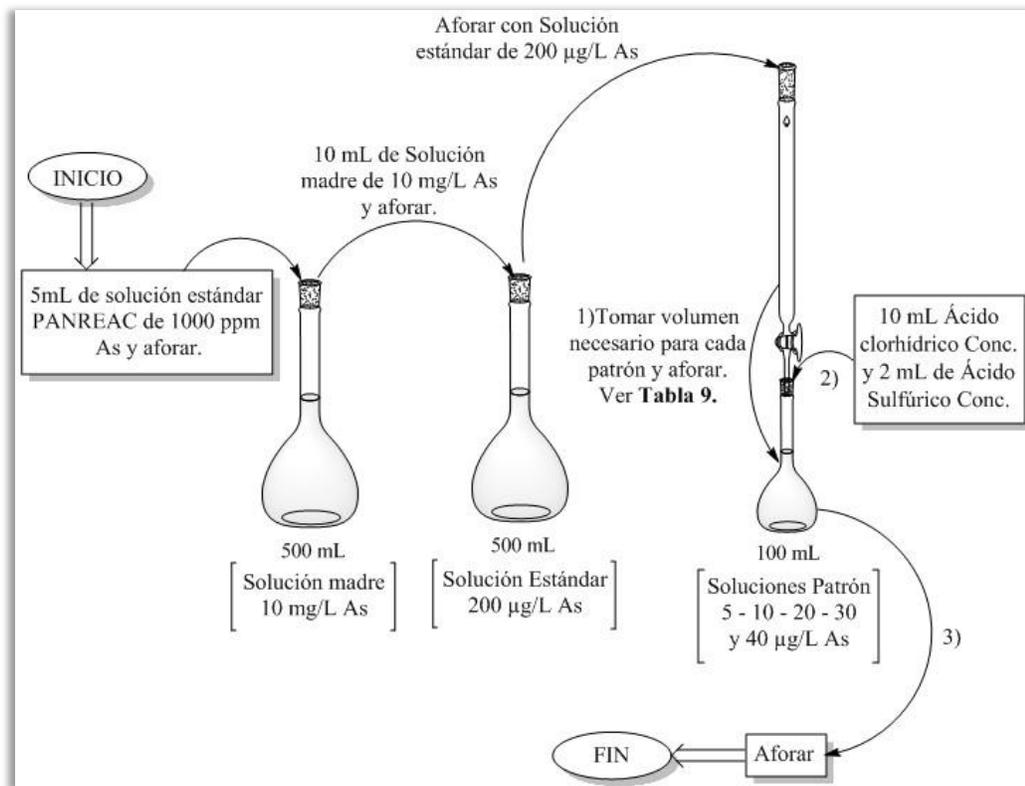
**Figura 15.** Procedimiento para la preparación de curvas de calibración de mercurio.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Para cada aforo que se realice, debe utilizarse agua desionizada. Lavar previamente el material de vidrio con ácido nítrico 10%.

**Tabla 12.** Preparación de patrones de mercurio a partir de solución estándar de 100 µg/L

Patrón	Concentración (µg/L)	Volumen de Solución estándar a tomar (mL)
Blanco	0,0	0,0
1	0,5	1,0
2	0,75	1,5
3	1	2
4	2	4
5	3	6

#### 5.2.2.1.4. Curva de calibración para Arsénico



**Figura 16.** Procedimiento para la preparación de curvas de calibración de arsénico.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Para cada aforo que se realice, debe utilizarse agua desionizada. Lavar previamente el material de vidrio con ácido nítrico 10%.

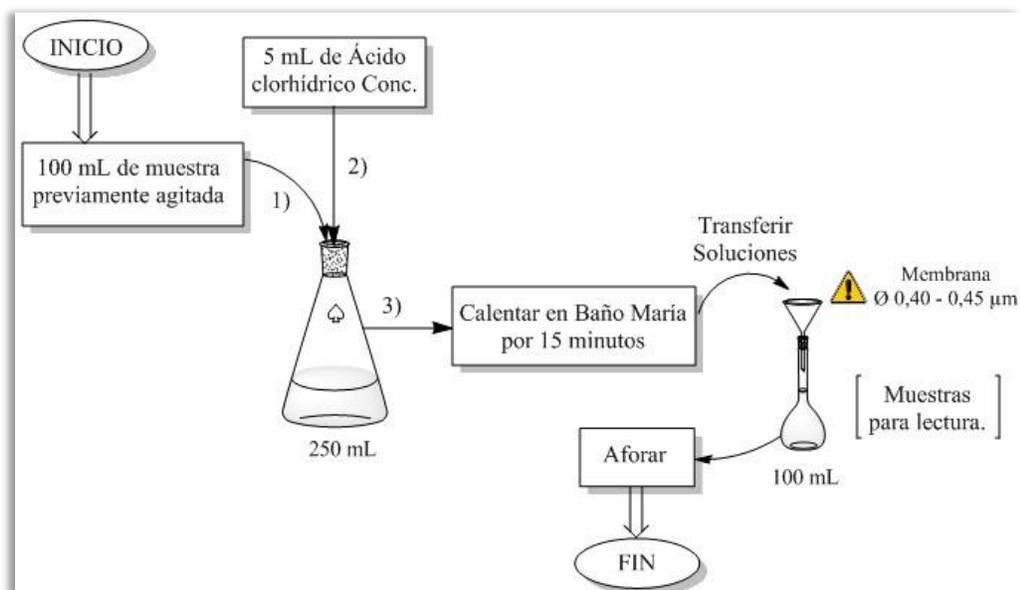
**Tabla 13.** Preparación de patrones de Arsénico a partir de solución estándar de 200 µg/L

Patrón	Concentración (µg/L)	Volumen de Solución madre a tomar (mL)
Blanco	0,0	0,0
1	5	2,5
2	10	5
3	20	10
4	30	15
5	40	20

### 5.2.2.2. Digestiones ácidas para muestras de agua

#### 5.2.2.2.1. Digestión para Cadmio, Cobre, Magnesio, Potasio, Sodio y Zinc.

El siguiente procedimiento fue extraído de [52] en la sección 3030C “*Treatment for Acid-Extractable Metals*”.



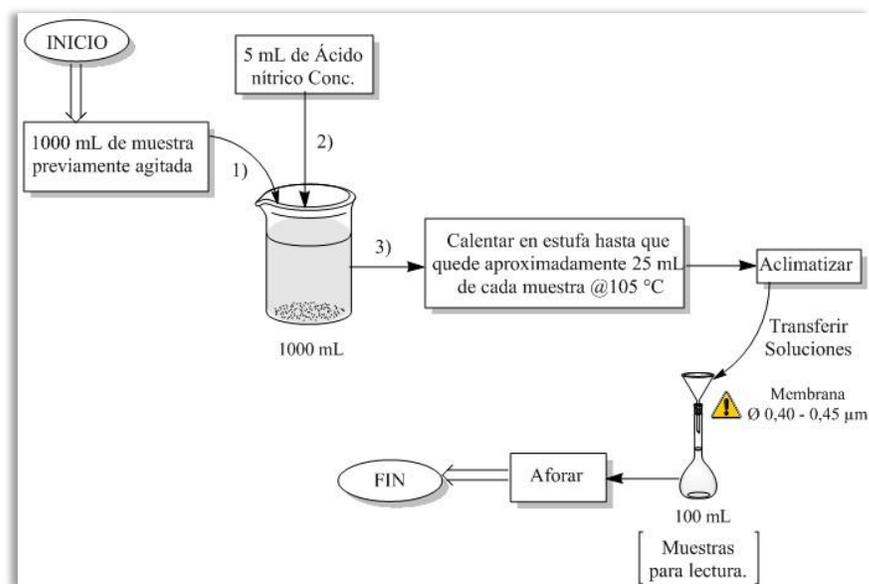
**Figura 17.** Procedimiento para digestión con HCl en muestras de agua (3030C)<sup>8</sup>.

Para las lecturas de Arsénico y Cromo se precisó utilizar otro tipo de digestión un poco más fuerte, para lo cual se adicionaron 10 mL de HCl y 2 de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, a cambio de 5 mL de HCl y se procedió de igual manera que en la **Figura 15**.

<sup>8</sup> Agitar muy bien las muestras antes de servir. Realizar aforos con agua desionizada.

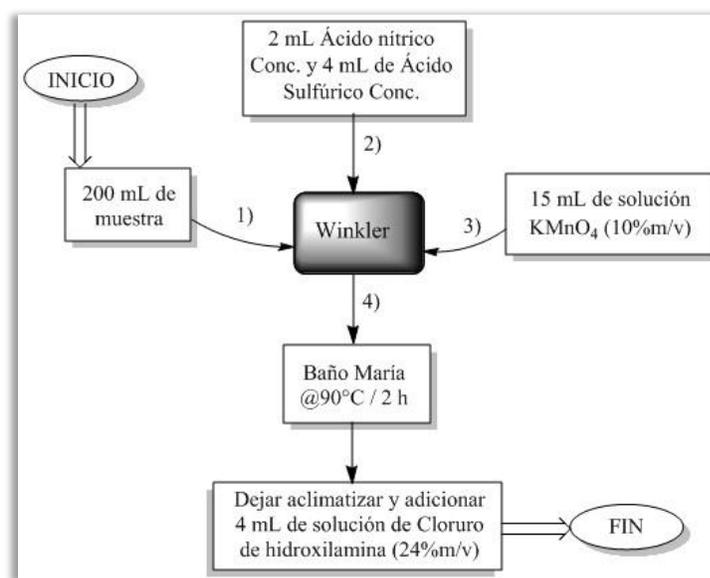
### 5.2.2.2. Digestión para Níquel y Plomo.

Inicialmente se intentó cuantificar Níquel y Plomo de la misma manera que para los metales de 5.2.2.2.1. pero al considerar que las medidas de los estándares marcaban absorbancias negativas y cercanas a cero, se optó por utilizar el método de concentración para los mismos y las muestras de agua en general.



**Figura 18.** Procedimiento para digestión con  $\text{HNO}_3$  por concentración de las muestras de agua.

### 5.2.2.2.3. Digestión para mercurio



**Figura 19.** Procedimiento: digestión de muestras de agua ( $\text{HNO}_3$  /  $\text{HCl}$  y  $\text{KMnO}_4$ ).

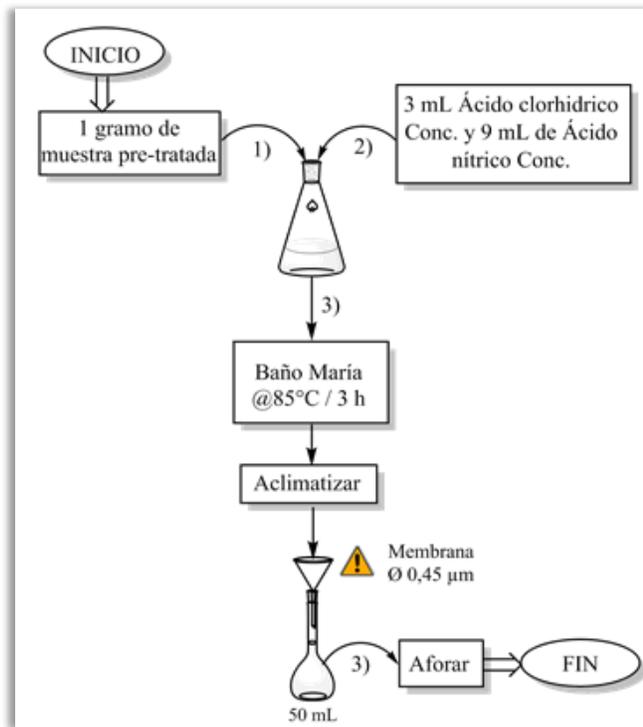
### 5.2.2.3. Digestiones ácidas para muestras de sedimentos y cenizas.

Las muestras de sedimentos fueron sometidas a un pre-tratamiento que consistía en poner en estufa @105°C durante 24 horas con el fin de retirar la humedad y poder pasar a través de un tamiz de  $\varnothing$  0,1  $\mu\text{m}$ . Las muestras tamizadas se preservan en bolsas Ziploc y en la nevera.



**Figura 20.** Ilustración de Secado, tamizado y preservación de sedimentos.

#### 5.2.2.3.1. Digestión para Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Magnesio, Níquel, Plomo, Potasio, Sodio y Zinc en Sedimentos y cenizas.

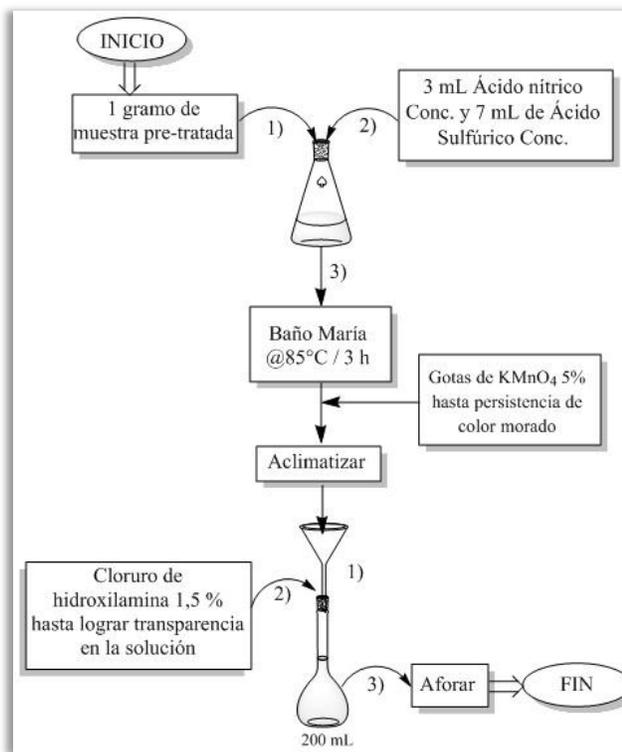


**Figura 21.** Procedimiento para digestión ácida con HCl / HNO<sub>3</sub> en Sedimentos.

#### 5.2.2.3.2. Digestión para mercurio en sedimentos y cenizas



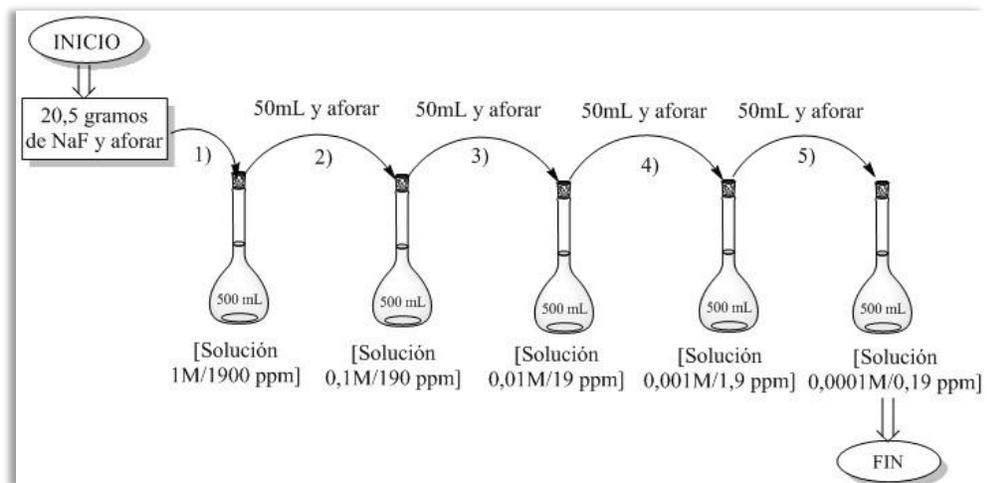
**Figura 22.** Ilustración de digestión y preparación de la muestra con KMnO<sub>4</sub>



**Figura 23.** Procedimiento para digestión con  $\text{HNO}_3$  /  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{KMnO}_4$

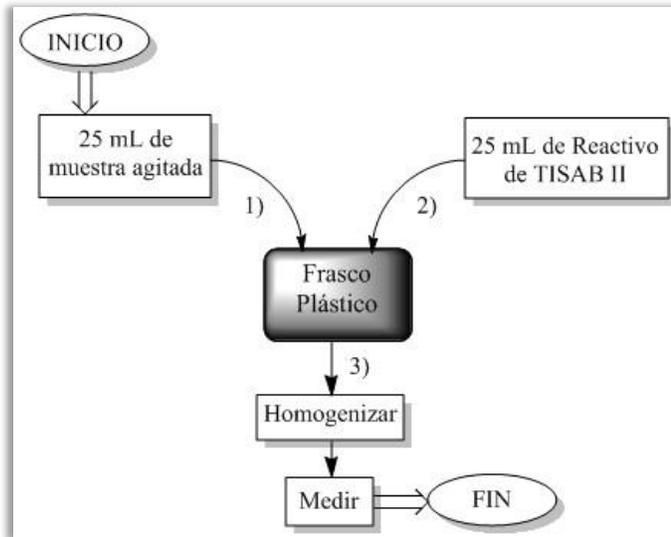
### 5.2.3. Cuantificación de fluoruros por el método potenciométrico de ión selectivo

#### 5.2.3.1. Preparación de curvas de calibración



**Figura 24.** Procedimiento para preparación de curvas de calibración para fluoruros.

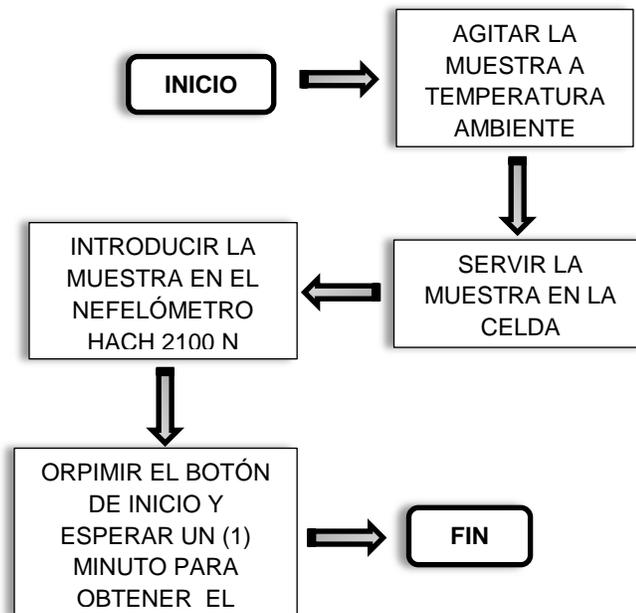
### 5.2.3.2. Preparación de muestras para medición.



**Figura 25.** Procedimiento para la preparación y medición de fluoruros en agua.

Para la lectura de fluoruros en sedimentos y cenizas, se utilizó 25 mL de cada solución obtenida en 5.2.2.3.1. con factor de dilución 10 y se procedió de igual manera que en la **Figura 25**.

### 5.2.4. Determinación de la turbiedad en muestras de agua



**Figura 26.** Procedimiento para determinar la turbiedad de una muestra de agua.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

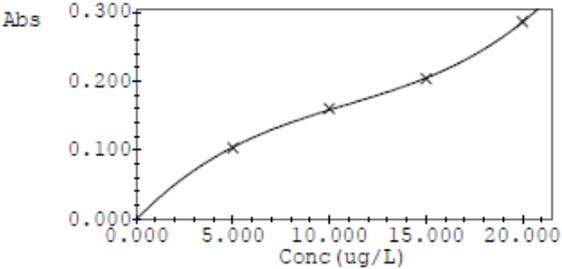
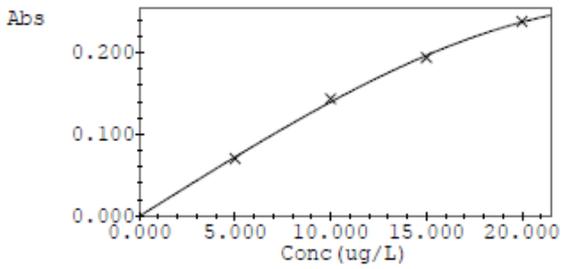
### 6.1. DETERMINACIÓN DE METALES EN AGUA, SEDIMENTOS Y CENIZAS VOLCÁNICAS POR ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.

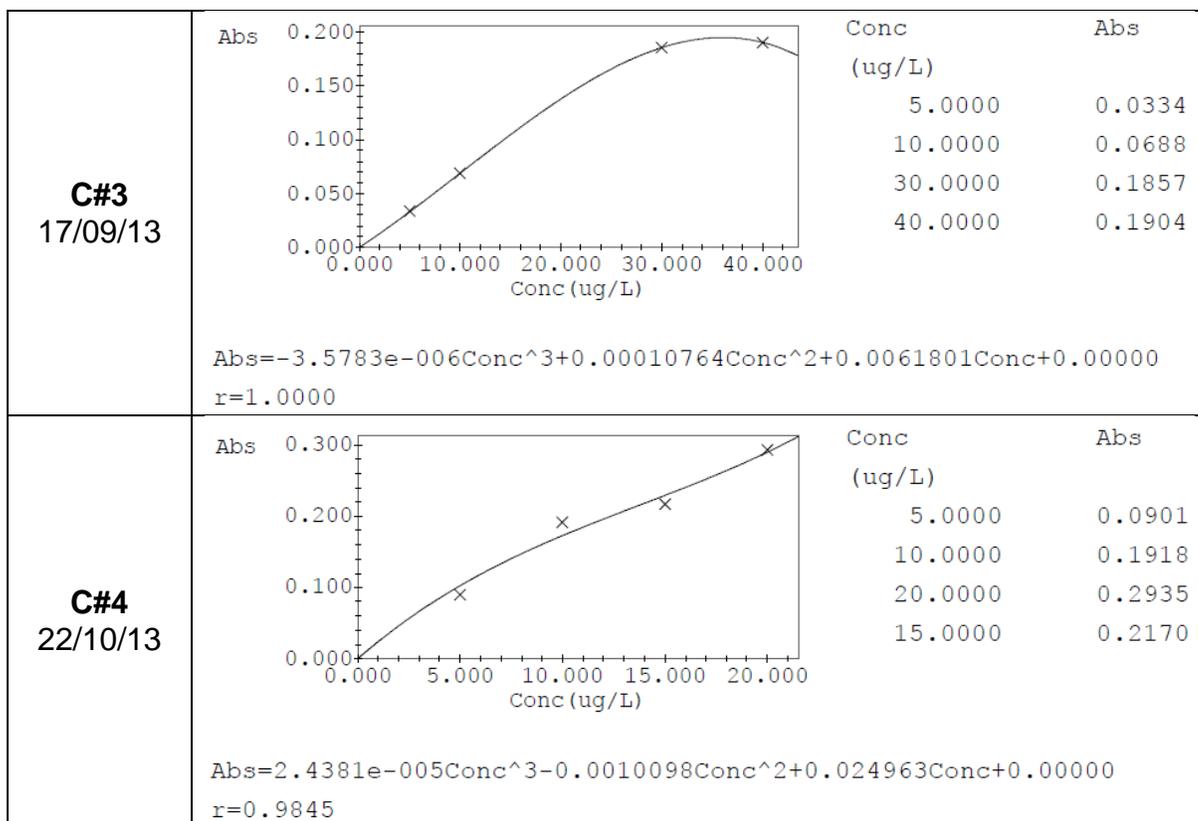
#### 6.1.1. Arsénico

Las lecturas para este metal en muestras de agua, sedimentos y cenizas fueron realizadas en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series mediante la técnica de EAA por generador de hidruros, por la cual se posee un límite de detección (LOD) para Arsénico de **< 0,01 mg/L (<10 µg/L)** según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

##### 6.1.1.1. Curvas de calibración

Tabla 14. Tabla resumen de curvas de calibración de Arsénico.

NOMBRE	CURVA												
<b>C#1</b> 12/06/13	 <p data-bbox="516 1352 1370 1415"> <math>Abs=5.6904e-005Conc^3-0.0018617Conc^2+0.028761Conc+0.00000</math>  <math>r=0.9999</math> </p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Conc (ug/L)</th> <th>Abs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.0000</td> <td>0.1034</td> </tr> <tr> <td>10.0000</td> <td>0.1598</td> </tr> <tr> <td>15.0000</td> <td>0.2036</td> </tr> <tr> <td>20.0000</td> <td>0.2860</td> </tr> </tbody> </table>	Conc (ug/L)	Abs	5.0000	0.1034	10.0000	0.1598	15.0000	0.2036	20.0000	0.2860	
Conc (ug/L)	Abs												
5.0000	0.1034												
10.0000	0.1598												
15.0000	0.2036												
20.0000	0.2860												
<b>C#2</b> 12/08/13	 <p data-bbox="516 1736 1408 1795"> <math>Abs=-7.4628e-006Conc^3+1.3565e-005Conc^2+0.014594Conc+0.00000</math>  <math>r=0.9992</math> </p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Conc (ug/L)</th> <th>Abs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.0000</td> <td>0.0700</td> </tr> <tr> <td>10.0000</td> <td>0.1434</td> </tr> <tr> <td>15.0000</td> <td>0.1944</td> </tr> <tr> <td>20.0000</td> <td>0.2382</td> </tr> </tbody> </table>	Conc (ug/L)	Abs	5.0000	0.0700	10.0000	0.1434	15.0000	0.1944	20.0000	0.2382	
Conc (ug/L)	Abs												
5.0000	0.0700												
10.0000	0.1434												
15.0000	0.1944												
20.0000	0.2382												

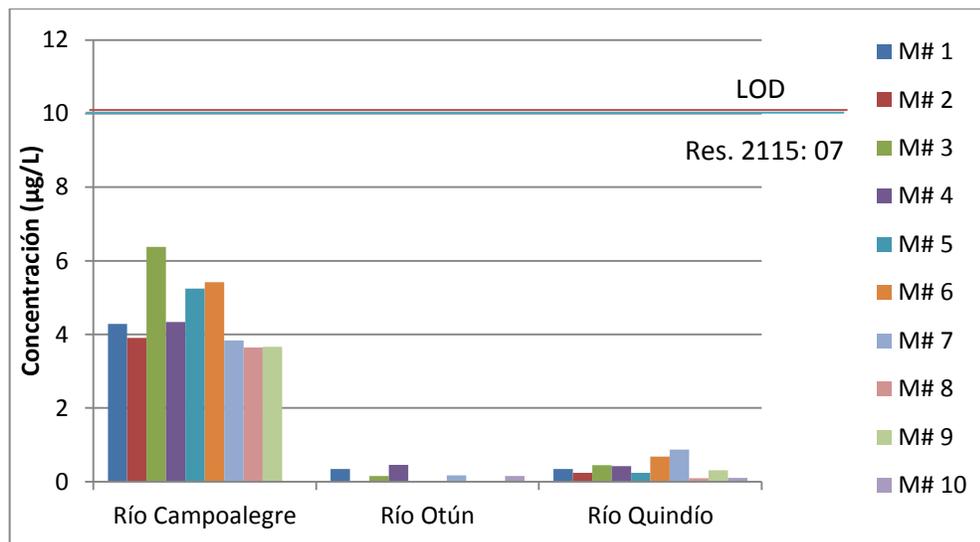


### 6.1.1.2. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 15.** Reporte de cuantificación de Arsénico en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (µg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	< LOD	C#1
	M# 2	RC_MT_02	< LOD	
	M# 3	RC_MT_03	< LOD	
	M# 4	RC_MT_04	< LOD	
	M# 5	RC_MT_05	< LOD	C#2
	M# 6	RC_MT_06	< LOD	
	M# 7	RC_MT_07	< LOD	
	M# 8	RC_MT_08	< LOD	
	M# 9	RC_MT_09	< LOD	C#3
	M# 10	RC_MT_10	< LOD	
Otún	M# 1	RP_MT_01	< LOD	C#1
	M# 2	RP_MT_02	< LOD	
	M# 3	RP_MT_03	< LOD	

Otún	M# 4	RP_MT_04	< LOD	C#4
	M# 5	RP_MT_05	< LOD	
	M# 6	RP_MT_06	< LOD	C#1
	M# 7	RP_MT_07	< LOD	
	M# 8	RP_MT_08	< LOD	C#2
	M# 9	RP_MT_09	< LOD	
	M# 10	RP_MT_10	< LOD	
Quindío	M# 1	RQ_MT_01	< LOD	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	< LOD	
	M# 3	RQ_MT_03	< LOD	
	M# 4	RQ_MT_04	< LOD	
	M# 5	RQ_MT_05	< LOD	
	M# 6	RQ_MT_06	< LOD	
	M# 7	RQ_MT_07	< LOD	
	M# 8	RQ_MT_08	< LOD	
	M# 9	RQ_MT_09	< LOD	
	M# 10	RQ_MT_10	< LOD	



**Figura 27.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Arsénico en los diferentes ríos según el número de muestreo

### 6.1.1.3. Resultados para análisis de sedimentos y cenizas

**Tabla 16.** Reporte de cuantificación de Arsénico en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	0,1092	C#4
Sedimento Otún	RP - S	0,0437	
Sedimento Quindío	RQ - S	0,1541	
Cenizas	CVNR	0,1192	

#### **OBSERVACIONES:**

A pesar de que los valores arrojados por el equipo se encuentran por debajo del LOD, se presenta una estabilidad pronunciada en las concentraciones de las diferentes muestras de cada río.

La abundancia aparente de Arsénico en el río Campoalegre (Ver **Figura 27**), es considerablemente mayor que en los demás ríos, lo que podría significar una mayor susceptibilidad a contaminación por cenizas volcánicas si se tiene en cuenta que estas contienen arsénico suficiente para llevar la concentración de dicho metal en estas aguas al umbral del LOD, que es el máximo permitido por Resolución 2115:2007 (Ver **Tabla 2**). De acuerdo a **Anexo A**, se requieren cerca de 8,5 kg de ceniza volcánica para contaminar 1m<sup>3</sup> de agua libre de arsénico (8,5 g contaminan 1 litro de agua libre de arsénico).

En cuanto a los sedimentos, se encontró que las concentraciones de arsénico están por debajo del estándar internacional [Por debajo de TEL] (ver **Tabla 5**).

## 6.1.2. Cadmio

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando la técnica de EAA por horno de grafito, a través de la cual se posee un límite de detección para Cadmio (LOD) **<0,0005 mg/L (<0,5 µg/L)** y un límite de cuantificación (LOC) **<0,0019 mg/L (<1,9 µg/L)** según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

### 6.1.2.1. Límite de detección y cuantificación del equipo para Cadmio

Para hallar el límite de detección de Cadmio para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969 por la técnica de EAA de llama aire-acetileno, se utilizaron las medidas de un patrón de Cadmio de 0,5 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

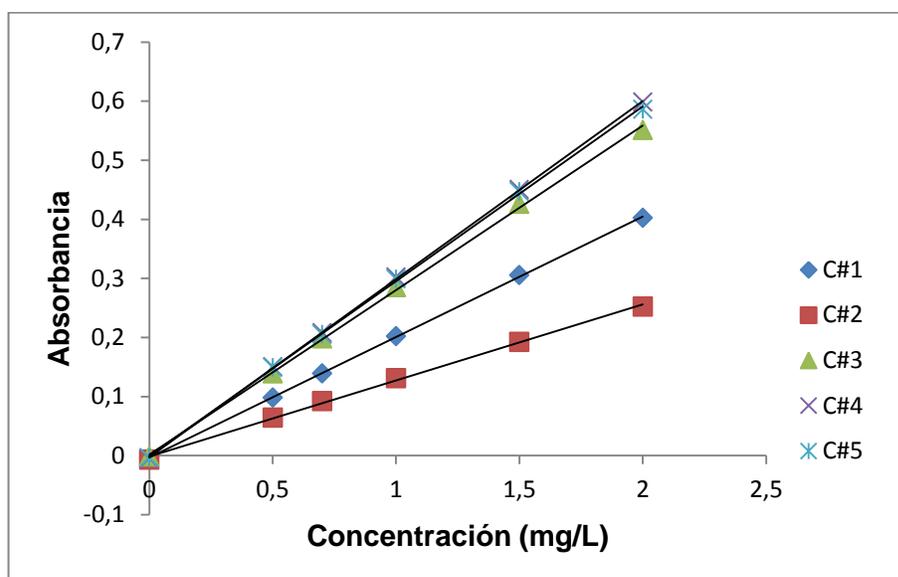
**Tabla 17.** Lecturas de patrón de CADMIO de 0,5 mg/L

# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	05/04/2013	0,4971
2	08/05/2013	0,5101
3	07/06/2013	0,4932
4	13/09/2013	0,5058
5	09/10/2013	0,5057
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		0,5023
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,0070
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,0231
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,0693

### 6.1.2.2. Curvas de calibración

**Tabla 18.** Curvas de calibración de cadmio (Cd)

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)
0	-0,004	-0,007	-0,002	-0,005	-0,004
0,5	0,098	0,064	0,139	0,150	0,149
0,7	0,139	0,092	0,198	0,208	0,205
1,0	0,202	0,131	0,285	0,302	0,299
1,5	0,305	0,192	0,426	0,450	0,447
2,0	0,402	0,252	0,551	0,598	0,586

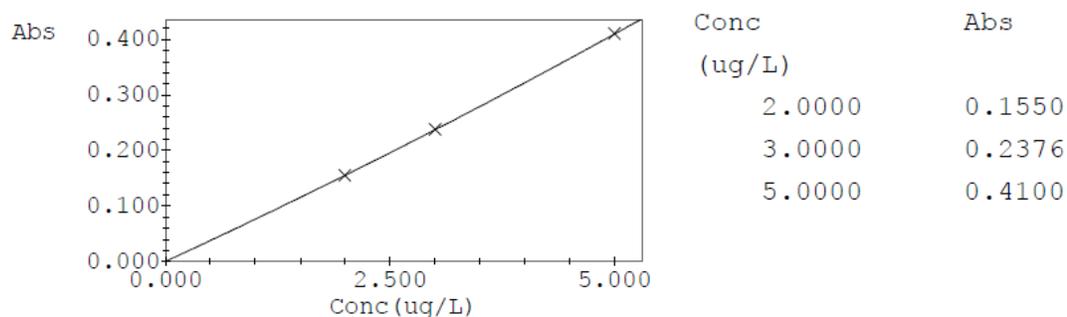


**Figura 28.** Curvas de calibración para Cadmio (Cd)

**Tabla 19.** Datos para curvas de calibración de Cadmio (Cd)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	05/04/2013	Abs = 0,2038Conc. – 0,0033	0,9999
C#2	08/05/2013	Abs = 0,1288Conc. – 0,0017	0,9983
C#3	07/06/2013	Abs = 0,2784Conc. + 0,0017	0,9993
C#4	13/09/2013	Abs = 0,3013Conc. – 0,0024	0,9999
C#5	09/10/2013	Abs = 0,2958Conc. – 0,0006	0,9997

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#6** (15/11/2013) y es la siguiente:



$$\text{Abs} = 0.0014549 \text{Conc}^2 + 0.074737 \text{Conc} + 0.00000$$

$$r = 1.0000$$

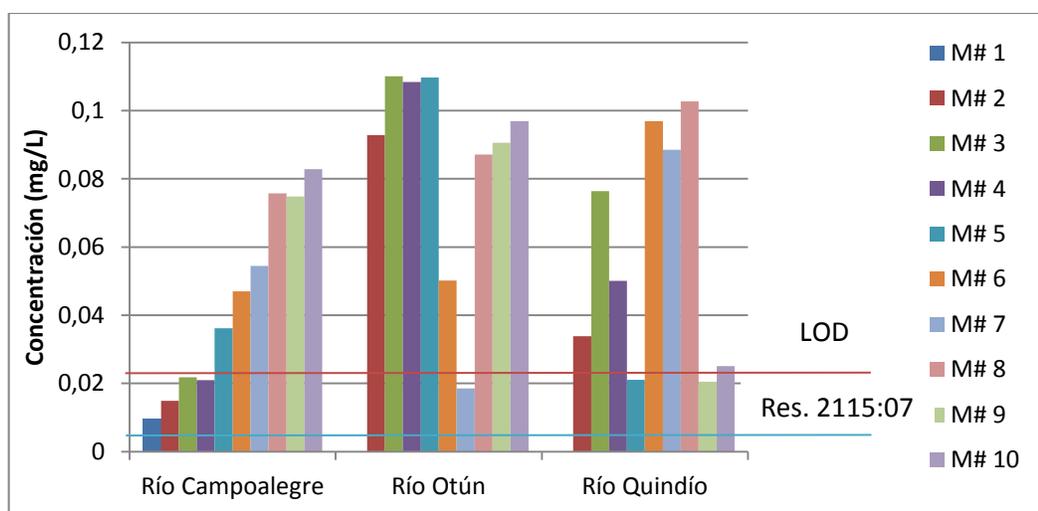
**Figura 29.** Curva de calibración de Cadmio C#6 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.2.3. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 20.** Reporte de cuantificación de Cadmio en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	<LOD	C#3
	M# 2	RC_MT_02	<LOD	
	M# 3	RC_MT_03	<LOD	
	M# 4	RC_MT_04	<LOD	
	M# 5	RC_MT_05	0,0362	C#4
	M# 6	RC_MT_06	0,047	
	M# 7	RC_MT_07	0,0545	
	M# 8	RC_MT_08	0,0757	
	M# 9	RC_MT_09	0,0748	
	M# 10	RC_MT_10	0,0828	
Otún	M# 1	RP_MT_01	<LOD	C#1
	M# 2	RP_MT_02	0,0928	C#2
	M# 3	RP_MT_03	0,1101	
	M# 4	RP_MT_04	0,1084	
	M# 5	RP_MT_05	0,1097	
	M# 6	RP_MT_06	0,0502	C#5
	M# 7	RP_MT_07	<LOD	C#3
	M# 8	RP_MT_08	0,0871	C#4
	M# 9	RP_MT_09	0,0906	
	M# 10	RP_MT_10	0,0969	

<b>Quindío</b>	M# 1	RQ_MT_01	<LOD	<b>C#1</b>
	M# 2	RQ_MT_02	0,0338	
	M# 3	RQ_MT_03	0,0764	
	M# 4	RQ_MT_04	0,0501	
	M# 5	RQ_MT_05	<LOD	
	M# 6	RQ_MT_06	0,0969	<b>C#2</b>
	M# 7	RQ_MT_07	0,0885	
	M# 8	RQ_MT_08	0,1027	
	M# 9	RQ_MT_09	<LOD	<b>C#3</b>
	M# 10	RQ_MT_10	0,0251	



**Figura 30.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Cadmio en los diferentes ríos según el número de muestreo.

#### 6.1.2.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 21.** Reporte de cuantificación de Cadmio en Sedimentos y Cenizas

<b>Muestra</b>	<b>Código</b>	<b>Concentración (mg/100g)</b>	<b>Curva</b>
<b>Sedimento Campoalegre</b>	RC - S	0,0616	<b>C#6</b>
<b>Sedimento Otún</b>	RP - S	0,0222	

<b>Sedimento Quindío</b>	RQ - S	0,0577	C#6
<b>Cenizas</b>	CVNR	0,0116	

### **OBSERVACIONES:**

Se presentaron abundantes fluctuaciones en las concentraciones de las muestras de agua en los ríos Otún y Quindío. Con respecto a las concentraciones de cadmio en el río Campoalegre, puede observarse una tendencia al aumento en cada uno de los muestreos realizados, que para el caso de este afluente, fueron más secuenciales (Ver **Figura 30**), además, si se observa la concentración de dicho metal en los sedimentos, se tiene que esta es la más alta de los ríos estudiados, incluso, más que en las cenizas volcánicas. Este comportamiento, permite inferir un evento de contaminación no natural que se podría estar presentando en este afluente.

En general, las concentraciones reportadas para este metal en las muestras de agua son muy altas en comparación con el máximo permitido por la Resolución 2115:2007 (Ver **Tabla 2**), no obstante, cabe aclarar que esta resolución se presenta como un referente ya que esta aplica únicamente para agua potable y no para agua cruda como es el caso del presente estudio. En cuanto a los sedimentos de los ríos Campoalegre y Quindío, se observan concentraciones que según estándares internacionales (Ver **Tabla 5**), se encuentra en el rango de efecto **posible** en el que de vez en cuando se presentan efectos adversos en los ecosistemas acuáticos, es decir, entre el TEL y el PEL.

Según el **Anexo A**, se requerirían casi 26 gramos de ceniza para llevar un litro de agua libre de Cadmio al máximo establecido en la Resolución 2115:2007, esto indica que la cantidad de cadmio presente en las cenizas volcánicas resultaría ser poco significativa en la contaminación de los afluentes estudiados ante una inminente incursión de dicho material, pues las concentraciones promedio de cadmio en estos afluentes según **6.4.** ya superan dicho máximo establecido.

#### **6.1.3. Cobre**

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando la técnica de EAA de llama aire-acetileno, por la cual se posee un límite de detección para Cobre (LOD) **<0,05**

mg/L (<50 µg/L) y un límite de cuantificación (LOC) <0,17 mg/L (<170 µg/L) según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

### 6.1.3.1. Límite de detección del equipo

Para hallar el límite de detección de Cobre para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969 por la técnica de EAA de llama aire-acetileno, se utilizaron las medidas de un patrón de Cobre de 0,3 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

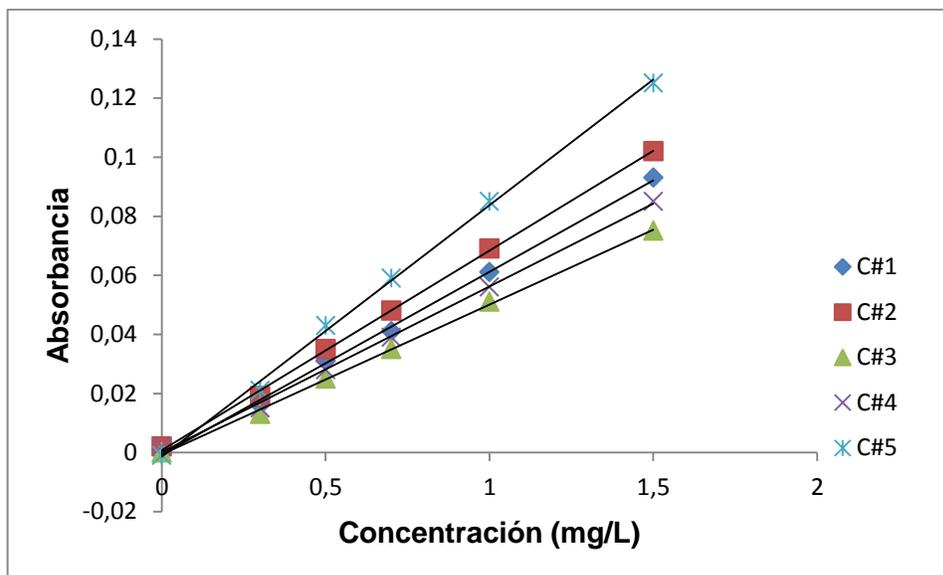
**Tabla 22.** Lecturas de patrón de COBRE de 0,3 mg/L

# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	20/03/2013	0,2714
2	07/05/2013	0,2696
3	07/06/2013	0,2697
4	13/09/2013	0,2690
5	07/10/2013	0,2632
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		0,2686
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,0031
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,0102
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,0307

### 6.1.3.2. Curvas de calibración

**Tabla 23.** Curvas de calibración de Cobre (Cu)

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)
0	0,001	0,002	0,000	0,002	-0,001
0,3	0,016	0,019	0,013	0,015	0,021
0,5	0,031	0,035	0,025	0,028	0,043
0,7	0,041	0,048	0,035	0,039	0,059
1,0	0,061	0,069	0,051	0,056	0,085
1,5	0,093	0,102	0,075	0,085	0,125

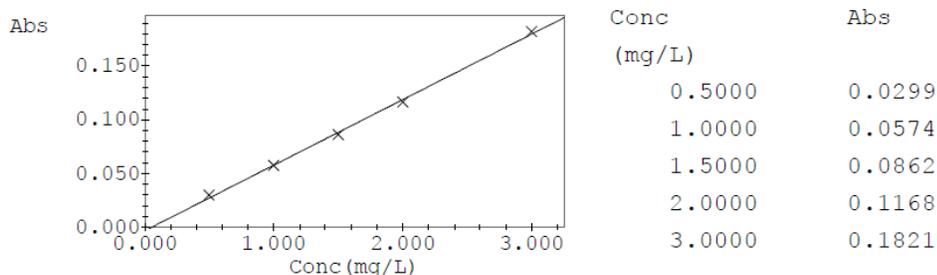


**Figura 31.** Curvas de calibración para Cobre (Cu)

**Tabla 24.** Datos para curvas de calibración de Cobre (Cu)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	20/03/2013	Abs = 0,0619Conc. - 0,0008	0,9981
C#2	07/05/2013	Abs = 0,0675Conc. + 0,0008	0,9990
C#3	07/06/2013	Abs = 0,0508Conc. - 0,0007	0,9989
C#4	13/09/2013	Abs = 0,0561Conc. + 9E-05	0,9982
C#5	07/10/2013	Abs = 0,0851Conc. - 0,0014	0,9983

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#6** y es la siguiente:



$$\text{Abs} = 0.061003\text{Conc} - 0.0031243$$

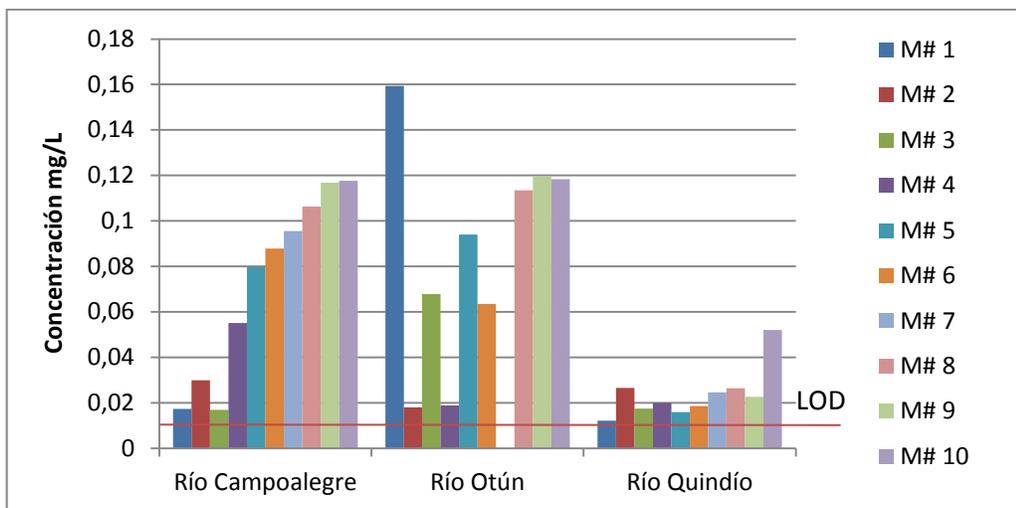
$$r = 0.9993$$

**Figura 32.** Curva de calibración de Cobre C#6 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.3.3. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 25.** Reporte de cuantificación de Cobre en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	0,0173	C#3
	M# 2	RC_MT_02	0,0299	
	M# 3	RC_MT_03	0,0169	
	M# 4	RC_MT_04	0,0551	
	M# 5	RC_MT_05	0,0797	C#4
	M# 6	RC_MT_06	0,0878	
	M# 7	RC_MT_07	0,0956	
	M# 8	RC_MT_08	0,1063	
	M# 9	RC_MT_09	0,1168	
	M# 10	RC_MT_10	0,1177	
Otún	M# 1	RP_MT_01	0,1593	C#1
	M# 2	RP_MT_02	0,0180	C#2
	M# 3	RP_MT_03	0,0678	
	M# 4	RP_MT_04	0,0189	
	M# 5	RP_MT_05	0,0940	
	M# 6	RP_MT_06	0,0635	C#5
	M# 7	RP_MT_07	<LOD	C#3
	M# 8	RP_MT_08	0,1134	C#4
	M# 9	RP_MT_09	0,1195	
	M# 10	RP_MT_10	0,1184	
Quindío	M# 1	RQ_MT_01	0,0122	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	0,0266	
	M# 3	RQ_MT_03	0,0175	
	M# 4	RQ_MT_04	0,0200	
	M# 5	RQ_MT_05	0,0159	
	M# 6	RQ_MT_06	0,0186	C#2
	M# 7	RQ_MT_07	0,0246	
	M# 8	RQ_MT_08	0,0264	
	M# 9	RQ_MT_09	0,0227	C#3
	M# 10	RQ_MT_10	0,0520	



**Figura 33.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Cobre en los diferentes ríos según el número de muestreo

#### 6.1.3.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 26.** Reporte de cuantificación de Cobre en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	3,5545	C#6
Sedimento Otún	RP - S	5,1063	
Sedimento Quindío	RQ - S	3,3999	
Cenizas	CVNR	2,2693	

#### OBSERVACIONES:

En cuanto a las concentraciones de Cobre en las muestras de agua reportadas, se tiene que:

- ✓ Hay uniformidad en los resultados para el río Quindío, siendo estos los más bajos en comparación a los demás ríos estudiados.
- ✓ Las concentraciones en las muestras del río Otún son muy cambiantes. Los valores reportados son altos en relación a los demás afluentes estudiados.
- ✓ Se observa un aumento gradual en las concentraciones de este metal para las muestras del río Campoalegre.
- ✓ La mayor concentración de cobre reportada en las muestras analizadas excede el LOD, sin embargo continua estando muy por debajo del máximo permitido por la Resolución 2115:2007 (Ver **Tabla 2**).

En cuanto a los sedimentos, se tiene que la muestra del río Otún se encuentra en el rango de efecto **posible** (entre TEL y PEL), en el que de vez en cuando se presentan efectos adversos en los ecosistemas acuáticos, según los estándares internacionales (Ver **Tabla 5**); esto podría deberse a un aporte de cobre generado por los conductos del sistema de aducción o válvulas de paso de la planta de tratamiento Villa santana, lugar donde se obtuvo la muestra.

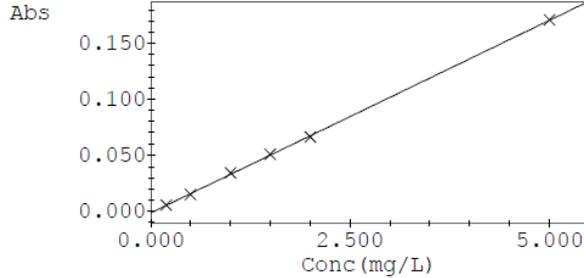
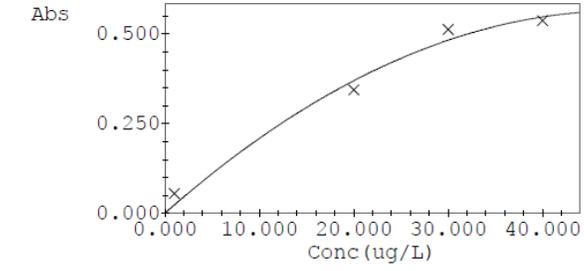
La concentración de cobre en la ceniza volcánica no representa un peligro significativo para la contaminación de los afluentes estudiados, pues se requeriría alrededor de 40 kg de ceniza para hacer que 1 m<sup>3</sup> de agua con concentración de Cobre según **6.4.**, alcance el máximo establecido en la Resolución 2115:2007 (Ver **Anexo A**).

#### **6.1.4. Cromo**

Las lecturas para este metal en muestras de agua, sedimentos y cenizas fueron realizadas en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series mediante la técnica de EAA de llama aire – óxido nitroso (Para las mediciones realizadas con **C#1**) y EAA por horno de grafito (Para las mediciones realizadas con **C#2**). Los límites de detección (LOD) para Cromo son de **<0,02 mg/L (<20 µg/L)** y **<0,0005 mg/L (0,5 µg/L)** y los límites de cuantificación (LOC) de **<0,04 mg/L (<40 µg/L)** y **<0,0020 mg/L (2 µg/L)** por las técnicas de EAA de llama aire – óxido nitroso y EAA por horno de grafito respectivamente, según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira..

### 6.1.4.1. Curvas de calibración

Tabla 27. Tabla resumen de curvas de calibración de Cromo

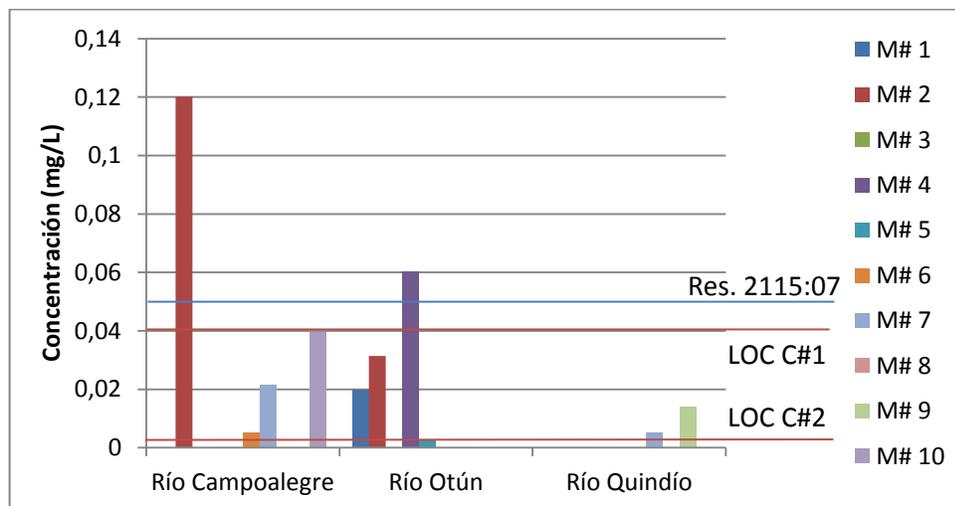
NOMBRE	CURVA		
<p><b>C#1</b> 17/06/13</p>	 <p>Abs=0.034440Conc-0.0014816 r=0.9999</p>	<p>Conc (mg/L)</p> <p>0.2000      0.0056 0.5000      0.0150 1.0000      0.0340 1.5000      0.0507 2.0000      0.0662 5.0000      0.1709</p>	<p>Abs</p>
<p><b>C#2</b> 12/12/13</p>	 <p>Abs=-0.00023931Conc^2+0.023266Conc+0.00000 r=0.9931</p>	<p>Conc (ug/L)</p> <p>1.0000      0.0554 20.0000     0.3438 30.0000     0.5128 40.0000     0.5372</p>	<p>Abs</p>

### 6.1.4.2. Resultados para análisis de muestras de agua.

Tabla 28. Reporte de cuantificación de Cromo en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
<p><b>Campoalegre</b></p>	M# 1	RC_MT_01	<LOC	<p>C#1</p>
	M# 2	RC_MT_02	0,1201	
	M# 3	RC_MT_03	<LOC	
	M# 4	RC_MT_04	<LOC	
	M# 5	RC_MT_05	<LOC	
	M# 6	RC_MT_06	0,0050	<p>C#2</p>
	M# 7	RC_MT_07	0,0216	

<b>Campoalegre</b>	M# 8	RC_MT_08	<LOC	C#2
	M# 9	RC_MT_09	<LOC	
	M# 10	RC_MT_10	0,0395	
<b>Otún</b>	M# 1	RP_MT_01	<LOC	C#1
	M# 2	RP_MT_02	<LOC	
	M# 3	RP_MT_03	<LOC	
	M# 4	RP_MT_04	0,0604	
	M# 5	RP_MT_05	<LOC	C#2
	M# 6	RP_MT_06	<LOC	
	M# 7	RP_MT_07	<LOC	C#1
	M# 8	RP_MT_08	<LOC	C#2
	M# 9	RP_MT_09	<LOC	
	M# 10	RP_MT_10	<LOC	
<b>Quindío</b>	M# 1	RQ_MT_01	<LOC	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	<LOC	
	M# 3	RQ_MT_03	<LOC	
	M# 4	RQ_MT_04	<LOC	
	M# 5	RQ_MT_05	<LOC	
	M# 6	RQ_MT_06	<LOC	
	M# 7	RQ_MT_07	<LOC	
	M# 8	RQ_MT_08	<LOC	
	M# 9	RQ_MT_09	<LOC	
	M# 10	RQ_MT_10	<LOC	



**Figura 34.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Cromo en los diferentes ríos según el número de muestreo

### 6.1.4.3. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 29.** Reporte de cuantificación de Cromo en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	0,2442	C#2
Sedimento Otún	RP - S	0,2268	
Sedimento Quindío	RQ - S	0,2458	
Cenizas	CVNR	0,2066	

#### OBSERVACIONES:

En cuanto a los reportes de Cromo Total en las muestras de agua analizadas, se tiene que:

- ✓ Se conservó una relativa estabilidad en las señales producidas por las muestras de agua del río Quindío; sin embargo, ninguna de ellas logró ser reportada como concentración al estar por debajo del LOC para la técnica utilizada.
- ✓ En general se muestran abundantes fluctuaciones en los datos obtenidos de las diferentes muestras de los ríos Campoalegre y Otún, presentándose valores de concentración entre 0 y 0,12 mg/L y 0 y 0,06 mg/L respectivamente.
- ✓ Si se comparan los valores máximos reportados con el valor referenciado en la Resolución 2115: 2007 para este metal (Ver **Tabla 2**), se tendrá que estos lo sobrepasan, lo que permite identificar un nivel de cromo que de por sí corresponde a un nivel considerable de contaminación.

En cuanto a los sedimentos de los tres ríos estudiados, se observan concentraciones que según estándares internacionales (Ver **Tabla 5**), se encuentra en el rango de efecto **mínimo** en el que rara vez ocurren efectos adversos en los ecosistemas acuáticos (Por debajo de TEL).

En cuanto a las cenizas, se tiene una situación diferente para cada río según lo propuesto en el **Anexo A**:

- ✓ Para el río Campoalegre, la cantidad de cromo presente en las cenizas volcánicas es suficiente para que 2 gramos de este material eleve la concentración de Cromo en 1 litro de agua de este río (Ver **6.4.**) hasta alcanzar el valor máximo establecido en la Resolución 2115:2007, hecho que convierte a las cenizas volcánicas en un material potencialmente contaminante para este afluente en caso de presentarse un episodio que permita la incursión de este material.
- ✓ Para el río Otún, se requerirían casi 24 gramos de ceniza para llevar un litro de agua libre de Cromo al máximo establecido en la Resolución 2115:2007 (Según el **Anexo A**), esto indica que la cantidad de cromo presente en las cenizas volcánicas resultaría ser poco significativa en la contaminación de este afluente ante una inminente incursión de dicho material, pues la concentración promedio en Cromo en el río Otún, según **6.4.**, ya supera dicho máximo establecido.
- ✓ Para el río Quindío, se obtuvo un promedio de concentración de cromo menor al LOC de la técnica con que se determinó. Si se observa la abundancia aparente de este metal en la **Figura 34**, se puede inferir que la concentración promedio se aproxima a cero, para lo cual según **Anexo A**, se requeriría alrededor de 24 g para contaminar 1 litro de esta agua, esto sugiere que las cenizas volcánicas no representa un peligro considerable de contaminación para este afluente ante una incursión de dicho material.

### 6.1.5. Magnesio

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando la misma técnica a través de la cual se posee un límite de detección para Magnesio (LOD) **<0,08 mg/L** y un límite de cuantificación (LOC) **<0,26 mg/L**, según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira..

#### 6.1.5.1. Límite de detección del equipo

Para hallar el límite de detección de Magnesio para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969, se utilizaron las medidas de un patrón de Magnesio de 0,1 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

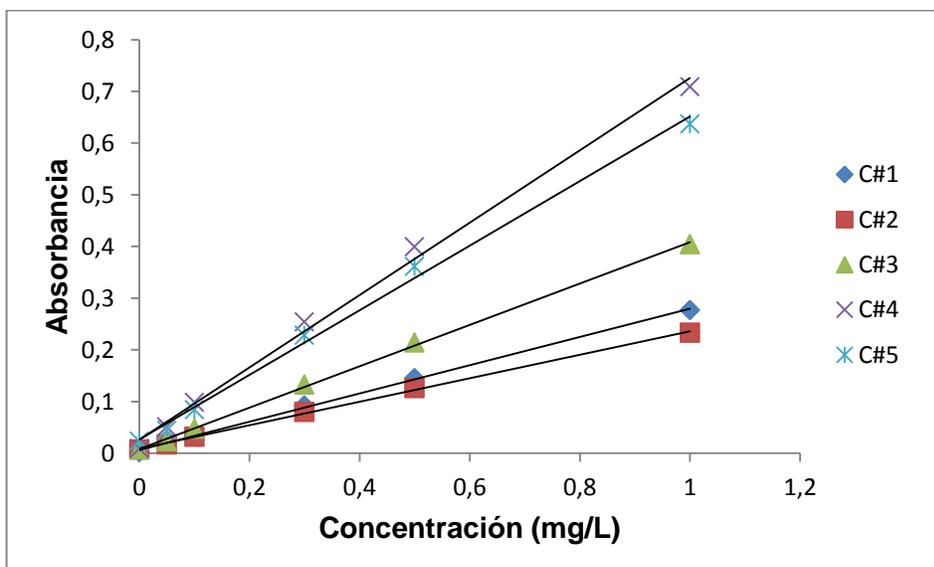
**Tabla 30.** Lecturas de patrón de MAGNESIO de 0,1 mg/L

# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	09/04/2013	0,1064
2	06/05/2013	0,1026
3	07/06/2013	0,0977
4	13/09/2013	0,1030
5	09/10/2013	0,0920
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		0,1004
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,0056
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,0185
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,0554

### 6.1.5.2. Curvas de calibración

**Tabla 31.** Curvas de calibración de magnesio (Mg)

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)
0	0,002	0,007	0,007	0,009	0,023
0,05	0,018	0,017	0,023	0,051	0,044
0,1	0,035	0,032	0,047	0,098	0,084
0,3	0,092	0,080	0,133	0,254	0,228
0,5	0,145	0,126	0,214	0,399	0,361
1,0	0,277	0,233	0,404	0,709	0,637

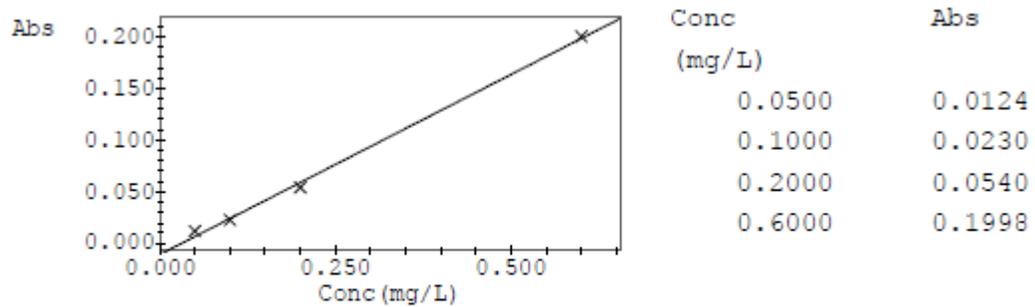


**Figura 35.** Curvas de calibración para Magnesio (Mg)

**Tabla 32.** Datos para curvas de calibración de Magnesio (Mg)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	09/04/2013	Abs = 0,2735Conc. + 0,0059	0,9991
C#2	06/05/2013	Abs = 0,227Conc. + 0,0087	0,9988
C#3	07/06/2013	Abs = 0,4002Conc. + 0,0079	0,9991
C#4	13/09/2013	Abs = 0,6999Conc. + 0,0259	0,9957
C#5	09/10/2013	Abs = 0,6247Conc. + 0,0265	0,9960

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#6** (15/11/2013) y es la siguiente:



$$\text{Abs} = 0.34737\text{Conc} - 0.010201$$

$$r = 0.9987$$

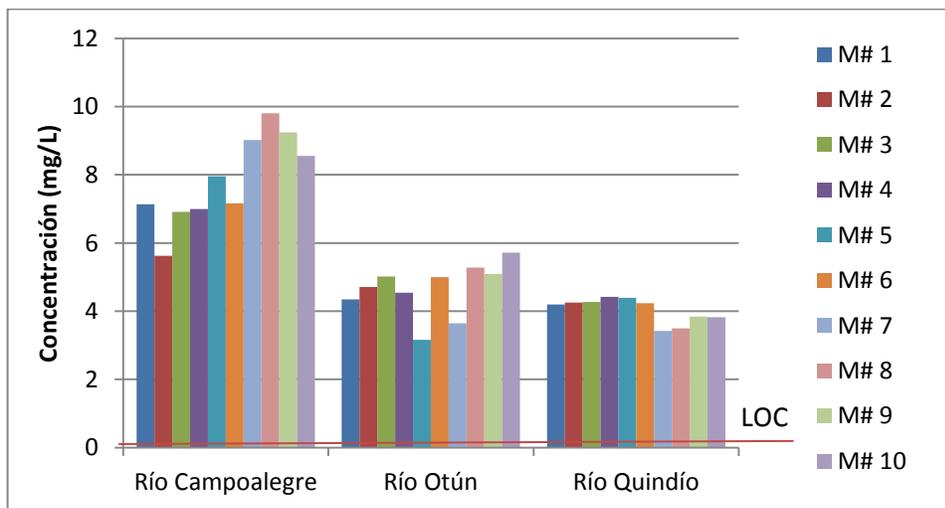
**Figura 36.** Curva de calibración de Magnesio C#6 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.5.3. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 33.** Reporte de cuantificación de Magnesio en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	7,134	C#3
	M# 2	RC_MT_02	5,624	
	M# 3	RC_MT_03	6,909	
	M# 4	RC_MT_04	6,992	
	M# 5	RC_MT_05	7,958	C#4
	M# 6	RC_MT_06	7,159	
	M# 7	RC_MT_07	9,019	
	M# 8	RC_MT_08	9,801	
	M# 9	RC_MT_09	9,240	
	M# 10	RC_MT_10	8,549	

Otún	M# 1	RP_MT_01	4,349	C#1
	M# 2	RP_MT_02	4,709	C#2
	M# 3	RP_MT_03	5,021	
	M# 4	RP_MT_04	4,544	
	M# 5	RP_MT_05	3,160	C#5
	M# 6	RP_MT_06	5,001	C#3
	M# 7	RP_MT_07	3,642	C#4
	M# 8	RP_MT_08	5,274	
	M# 9	RP_MT_09	5,090	
	M# 10	RP_MT_10	5,717	
Quindío	M# 1	RQ_MT_01	4,196	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	4,253	
	M# 3	RQ_MT_03	4,270	
	M# 4	RQ_MT_04	4,416	
	M# 5	RQ_MT_05	4,395	
	M# 6	RQ_MT_06	4,237	C#2
	M# 7	RQ_MT_07	3,420	
	M# 8	RQ_MT_08	3,498	
	M# 9	RQ_MT_09	3,842	C#3
	M# 10	RQ_MT_10	3,820	



**Figura 37.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Magnesio en los diferentes ríos según el número de muestreo

#### 6.1.5.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 34.** Reporte de cuantificación de Magnesio en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (g/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	0,8898	C#6
Sedimento Otún	RP - S	0,6074	
Sedimento Quindío	RQ - S	1,1315	
Cenizas	CVNR	0,2676	

#### **OBSERVACIONES:**

En cuanto a las concentraciones de magnesio en las muestras de agua analizadas, se observó un comportamiento estable de mínimas fluctuaciones. Aunque dichas concentraciones fueron relativamente altas y superaron por mucho el LOC para la técnica, estas estuvieron muy por debajo del máximo permitido por la Resolución 2115:2007 (Ver **Tabla 2**).

Para las concentraciones de magnesio en sedimentos no se tiene referencia estándar, pues este corresponde a un metal de significativa abundancia en estas matrices, lo que se ve reflejado en los datos obtenidos para los sedimentos de los tres ríos estudiados.

En cuanto a las cenizas volcánicas, se requieren en promedio 11 gramos de este material para elevar la concentración de magnesio de 1 litro de agua de cualquiera de los ríos estudiados, hasta el máximo establecido por la Resolución 2115:2007 (Según **Anexo A**), esto indica que las cenizas volcánicas representan un peligro moderado de contaminación en el caso hipotético de que todo el contenido de magnesio de las cenizas se depositara en la masa de agua.

#### **6.1.6. Mercurio**

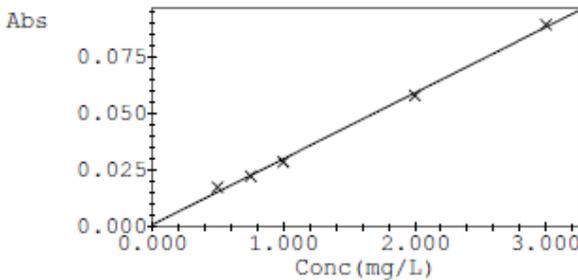
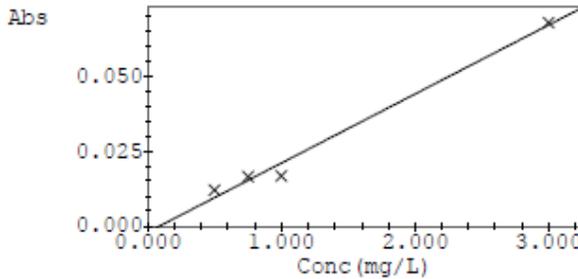
Las lecturas para este metal en muestras de agua, sedimentos y cenizas fueron realizadas en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series mediante la técnica de EAA por Vapor Frio de Mercurio, a través de la cual se posee un límite de detección (LOD) para Mercurio de **< 0,0005 mg/L (<0,5 µg/L)** y un límite de cuantificación de

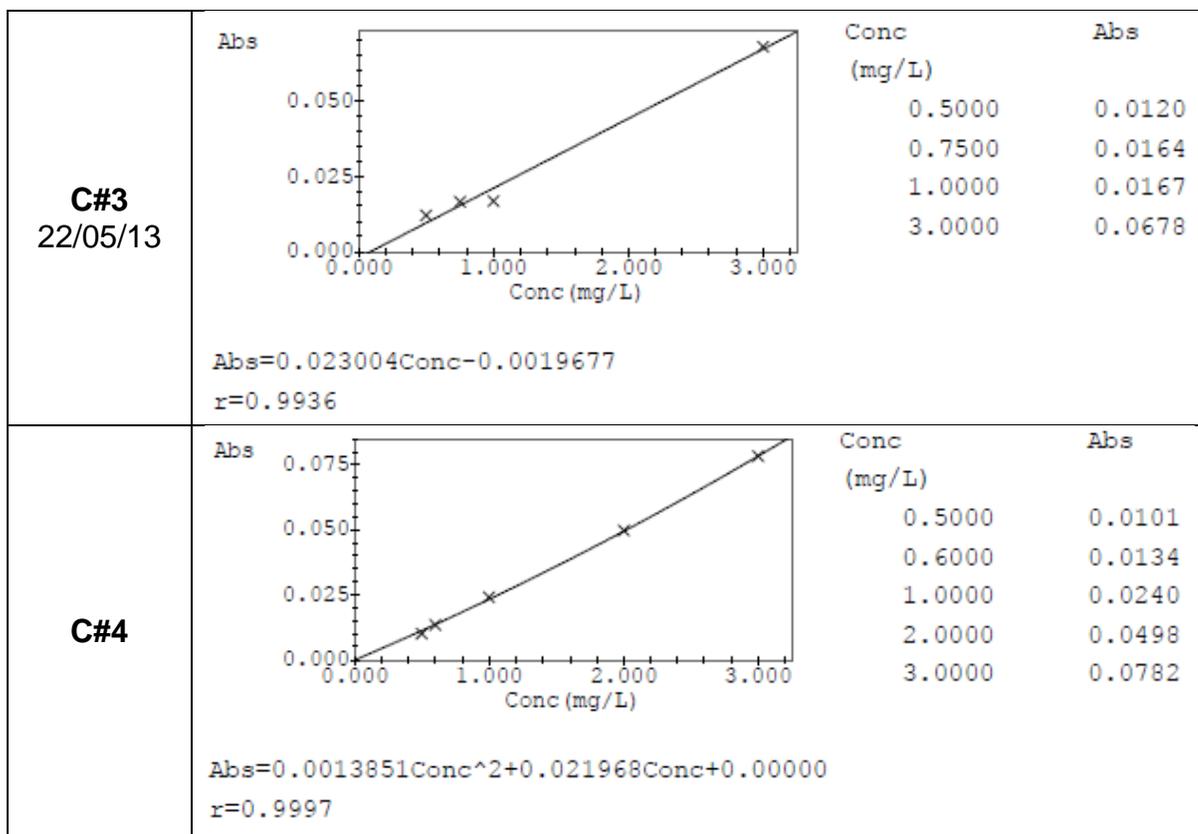
<0,0008 mg/L (0,8 µg/L), según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

### 6.1.6.1. Curvas de calibración

A continuación se muestran capturas de las curvas reportadas por el equipo, con su identificación, fecha y respectivos datos de linealidad.

**Tabla 35.** Tabla resumen de curvas de calibración de mercurio.

NOMBRE	CURVA													
<p><b>C#1</b> 11/04/13</p>	 <p>Abs=0.029066Conc+0.00099390 r=0.9988</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Conc (mg/L)</th> <th>Abs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5000</td><td>0.0175</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>0.0224</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>0.0286</td></tr> <tr><td>2.0000</td><td>0.0580</td></tr> <tr><td>3.0000</td><td>0.0892</td></tr> </tbody> </table>	Conc (mg/L)	Abs	0.5000	0.0175	0.7500	0.0224	1.0000	0.0286	2.0000	0.0580	3.0000	0.0892
Conc (mg/L)	Abs													
0.5000	0.0175													
0.7500	0.0224													
1.0000	0.0286													
2.0000	0.0580													
3.0000	0.0892													
<p><b>C#2</b> 10/07/13</p>	 <p>Abs=0.023004Conc-0.0019677 r=0.9936</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Conc (mg/L)</th> <th>Abs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5000</td><td>0.0120</td></tr> <tr><td>0.7500</td><td>0.0164</td></tr> <tr><td>1.0000</td><td>0.0167</td></tr> <tr><td>3.0000</td><td>0.0678</td></tr> </tbody> </table>	Conc (mg/L)	Abs	0.5000	0.0120	0.7500	0.0164	1.0000	0.0167	3.0000	0.0678		
Conc (mg/L)	Abs													
0.5000	0.0120													
0.7500	0.0164													
1.0000	0.0167													
3.0000	0.0678													

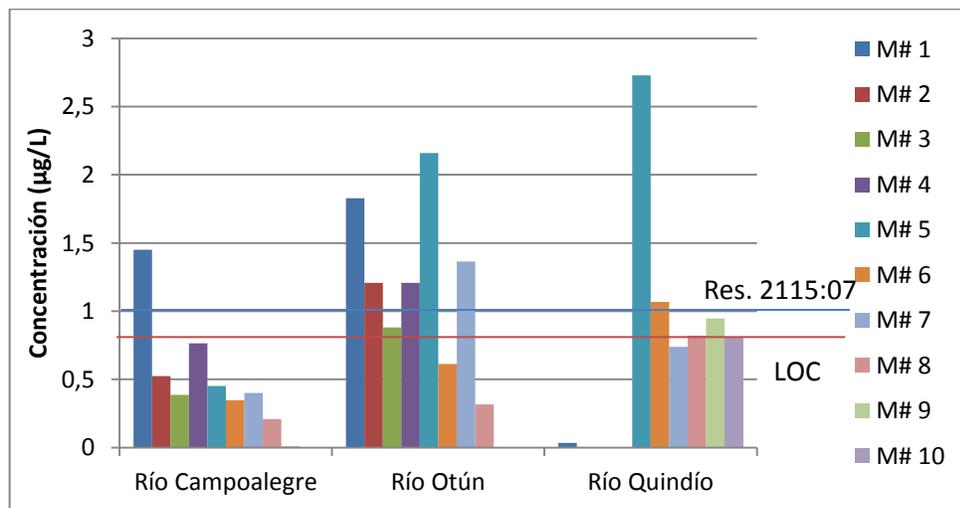


### 6.1.6.2. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 36.** Reporte de cuantificación de Mercurio en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (µg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	1,4505	C#3
	M# 2	RC_MT_02	<LOC	C#2
	M# 3	RC_MT_03	<LOC	
	M# 4	RC_MT_04	<LOC	
	M# 5	RC_MT_05	<LOC	
	M# 6	RC_MT_06	<LOC	
	M# 7	RC_MT_07	<LOC	
	M# 8	RC_MT_08	<LOC	
	M# 9	RC_MT_09	<LOC	
	M# 10	RC_MT_10	<LOC	

Otún	M# 1	RP_MT_01	1,8271	C#1
	M# 2	RP_MT_02	1,2071	C#3
	M# 3	RP_MT_03	0,8811	
	M# 4	RP_MT_04	1,2071	
	M# 5	RP_MT_05	2,1591	C#4
	M# 6	RP_MT_06	<LOC	
	M# 7	RP_MT_07	1,3632	C#2
	M# 8	RP_MT_08	<LOC	
	M# 9	RP_MT_09	<LOC	
	M# 10	RP_MT_10	<LOC	
Quindío	M# 1	RQ_MT_01	<LOC	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	<LOC	
	M# 3	RQ_MT_03	<LOC	
	M# 4	RQ_MT_04	<LOC	
	M# 5	RQ_MT_05	2,7286	C#3
	M# 6	RQ_MT_06	1,0680	
	M# 7	RQ_MT_07	<LOC	
	M# 8	RQ_MT_08	0,8202	
	M# 9	RQ_MT_09	0,9463	
	M# 10	RQ_MT_10	0,8034	



**Figura 38.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Mercurio en los diferentes ríos según el número de muestreo

### 6.1.6.3. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 37.** Reporte de cuantificación de Mercurio en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (µg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	40,4572	C#4
Sedimento Otún	RP - S	21,8529	
Sedimento Quindío	RQ - S	17,8560	
Cenizas	CVNR	9,3821	

#### OBSERVACIONES:

En la **Figura 38.** se observa que un considerable número de muestras presentaron concentraciones que sobrepasaban o se encontraban próximas a alcanzar el LOC de la técnica, incluso se presentaron casos en que los valores obtenidos superaron el máximo establecido por la Resolución 2115:2007 (Ver **Tabla 2**). Cabe resaltar la alta concentración que presentó en general el río Otún (Ver **6.4.**), lo que evidencia contaminación en este afluente por este metal.

En cuanto a las concentraciones de mercurio en los sedimentos se presentaron los siguientes casos:

- ✓ Los sedimentos del río Otún y Quindío presentaron concentraciones entre TEL y PEL según estándares internacionales (Ver tabla 5), lo que indica que están en el rango de efecto **posible** en el que de vez en cuando se presentan efectos adversos en los ecosistemas acuáticos, cabe resaltar que la muestra del río Quindío se encuentra muy próxima al valor de TEL para este metal.
- ✓ Un caso que preocupa es el de la concentración de mercurio que presentan los sedimentos del río Campoalegre, pues aunque también se encuentra entre TEL y PEL como en el caso del río Otún y Quindío, esta es tan alta que se está próxima a alcanzar el valor estipulado para PEL, valor a partir del cual se dice que inicia el rango de efecto **probable**, en el que frecuentemente se presentan efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos.

Las concentraciones promedio de mercurio en los diferentes ríos, según el **6.4.** exceden el máximo establecido en la resolución 2115:2007, por esto, el aporte que pudieran hacer las cenizas volcánicas al nivel de contaminación se convierte en un factor secundario pero de consideración ya que, según el **Anexo A**, se requeriría cerca de 11 gramos de dicho material para hacer que 1 litro de agua libre de mercurio alcanzara la concentración umbral establecida en la normativa mencionada, asumiendo el caso hipotético de que todo el contenido de mercurio de las cenizas se integrara en la masa de agua.

Cabe mencionar que el contenido de mercurio en las cenizas fue relativamente menor que en los sedimentos de los tres ríos.

### 6.1.7. Níquel

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno, utilizando la metodología de concentración de muestra para aumentar la sensibilidad; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando técnica de EAA por horno de grafito, a través de la cual se posee un límite de detección para Níquel (LOD) **<0,005 mg/L (5 µg/L)**, según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### 6.1.7.1. Límite de detección del equipo

Para hallar el límite de detección de Níquel para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969, se utilizaron las medidas de un patrón de Níquel de 1 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

**Tabla 38.** Lecturas de patrón de NÍQUEL de 1 mg/L

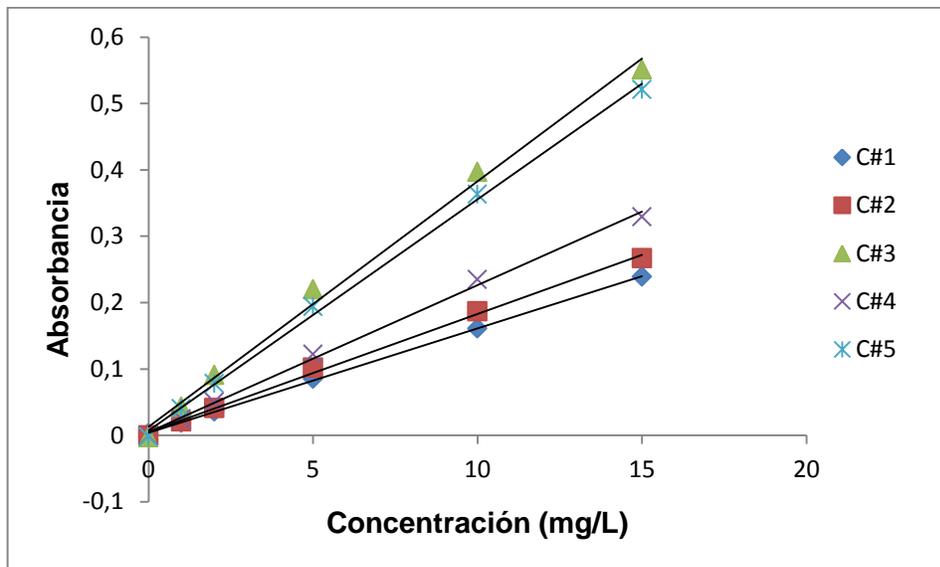
# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	06/05/2013	0,9490
2	14/05/2013	0,8933
3	04/10/2013	0,8081
4	16/04/2013	0,9095
5	18/03/2013	0,9368
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		0,8993
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,0555
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,0183
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,0549

**Nota:** El LOD y LOC fue multiplicado por el factor de concentración: 0,1

### 6.1.7.2. Curvas de calibración

**Tabla 39.** Curvas de calibración de Níquel (Ni)

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)
0	0,003	0,000	-0,003	-0,001	-0,002
1	0,019	0,021	0,043	0,025	0,040
2	0,036	0,041	0,091	0,050	0,078
5	0,085	0,102	0,220	0,122	0,194
10	0,161	0,187	0,397	0,235	0,363
15	0,239	0,267	0,551	0,329	0,521

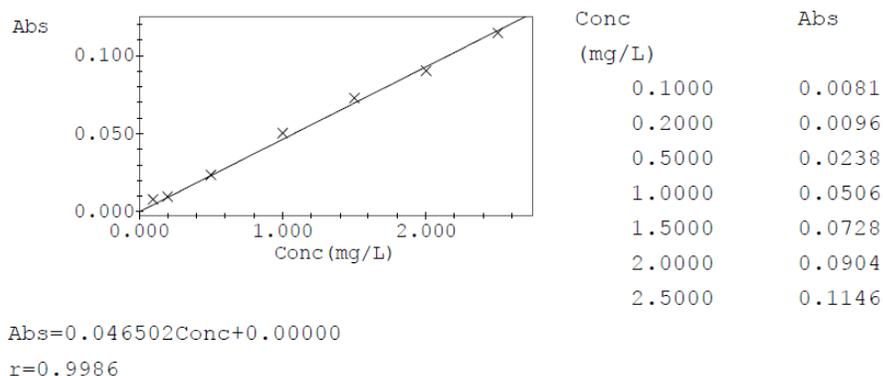


**Figura 39.** Curvas de calibración para Níquel (Ni)

**Tabla 40.** Datos para curvas de calibración de Níquel (Ni)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	06/05/2013	Abs = 0,0157Conc. + 0,0041	0,9998
C#2	14/05/2013	Abs = 0,0178Conc. + 0,0051	0,9976
C#3	04/10/2013	Abs = 0,0370Conc. + 0,0131	0,9946
C#4	16/04/2013	Abs = 0,2221Conc. + 0,0049	0,9974
C#5	18/03/2013	Abs = 0,0348Conc. + 0,0074	0,9982

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#6** y es la siguiente:



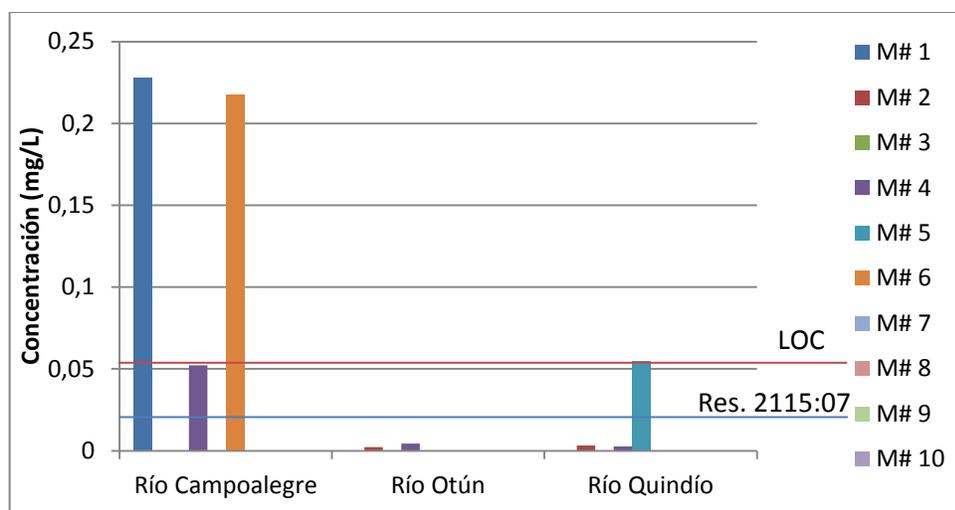
**Figura 40.** Curva de calibración de Níquel C#6 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.7.3. Resultados para análisis de muestras de agua

**Tabla 41.** Reporte de cuantificación de Níquel en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	0,2278	C#3
	M# 2	RC_MT_02	<LOD	
	M# 3	RC_MT_03	<LOD	
	M# 4	RC_MT_04	0,0523	
	M# 5	RC_MT_05	<LOD	
	M# 6	RC_MT_06	0,7179	
	M# 7	RC_MT_07	<LOD	
	M# 8	RC_MT_08	<LOD	
	M# 9	RC_MT_09	<LOD	
	M# 10	RC_MT_10	<LOD	
Otún	M# 1	RP_MT_01	0,0022	C#1.
	M# 2	RP_MT_02	<LOD	C#2
	M# 3	RP_MT_03	0,0045	
	M# 4	RP_MT_04	<LOD	
	M# 5	RP_MT_05	<LOD	C#3
	M# 6	RP_MT_06	<LOD	
	M# 7	RP_MT_07	<LOD	
	M# 8	RP_MT_08	<LOD	
	M# 9	RP_MT_09	<LOD	
	M# 10	RP_MT_10	<LOD	

Quindío	M# 1	RQ_MT_01	<LOD	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	0,0033	
	M# 3	RQ_MT_03	<LOD	
	M# 4	RQ_MT_04	0,0026	
	M# 5	RQ_MT_05	0,05	
	M# 6	RQ_MT_06	<LOD	C#2
	M# 7	RQ_MT_07	<LOD	
	M# 8	RQ_MT_08	<LOD	
	M# 9	RQ_MT_09	<LOD	C#3
	M# 10	RQ_MT_10	<LOD	



**Figura 41.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Níquel en los diferentes ríos según el número de muestreo

**NOTA ACLARATORIA:** Las concentraciones de las muestras se encuentran bajo el LOD según la **Figura 41**. sin embargo, en la **Tabla 41**. se reportan concentraciones por debajo de este debido al método aplicado, pues estos valores son producto de un tratamiento matemático deductivo que consiste en multiplicar por 0,1 la concentración reportada por el equipo teniendo en consideración la metodología utilizada para preparar las muestras.

#### 6.1.7.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 42.** Reporte de cuantificación de Níquel en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	1,9348	C#6
Sedimento Otún	RP - S	0,6870	
Sedimento Quindío	RQ - S	2,7006	
Cenizas	CVNR	1,2023	

#### OBSERVACIONES:

En cuanto a las concentraciones de Níquel en las muestras de agua se obtuvo que:

- ✓ El río Campoalegre presentó el comportamiento menos estable de los ríos analizados; en él se observó, según los análisis corridos, un comportamiento repetitivo en dos de sus muestras, M#1 y M#6, en las que se encontraron concentraciones que sobrepasaban significativamente el máximo establecido en la Resolución 2115:2007 (Ver **Tabla 2**). Otro caso aislado que merece atención es el de la muestra M#4, la cual presentó una señal que correspondió a un valor muy cercano al LOC.
- ✓ Los ríos Otún y Quindío mostraron un comportamiento similar y estable en el que se presentaron señales mínimas que demostraron la menuda o nula presencia de este metal en las muestras analizadas. Cabe resaltar una excepción que se presentó en la muestra M#5 del río Quindío, que mostró una concentración similar al LOC calculado, el cual es un poco mayor al máximo establecido en la tabla 2.

En cuanto a los sedimentos, las muestras del río Campoalegre y Quindío presentaron concentraciones entre TEL y PEL de acuerdo a los valores estándar aportados por MacDonald et al. (Ver **Tabla 5**), lo que según estándares internacionales indica que están en el rango de efecto **posible** en el que de vez en cuando se presentan efectos adversos en los ecosistemas acuáticos, cabe resaltar que la muestra del río Campoalegre se encuentra muy próxima al valor de TEL

para este metal. La concentración de Níquel en los sedimentos del río Otún es mínima.

La concentración de Níquel en las cenizas volcánicas, de acuerdo a la concentración promedio de este metal en los ríos estudiados (Ver **6.4.**), representa un peligro significativo para la contaminación de los afluentes estudiados en el hipotético caso de que todo el contenido de Níquel de las cenizas se integrara en la masa de agua, pues según el **Anexo A**, en cualquiera de los ríos se requeriría menos de 200 miligramos de ceniza para hacer que 1 L de agua con concentración de Níquel según **6.4.**, alcance el máximo establecido en la Resolución 2115:2007 (Ver **Anexo A**).

### 6.1.8. Plomo

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno, utilizando la metodología de concentración de muestra para aumentar la sensibilidad; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando técnica de EAA por horno de grafito, a través de la cual se posee un límite de detección para Níquel (LOD) **<0,005 mg/L (5 µg/L)** y un límite de cuantificación(LOC) **<0,01 mg/L (10 µg/L)**, según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### 6.1.8.1. Límite de detección del equipo

Para hallar el límite de detección de Plomo para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969, se utilizaron las medidas de un patrón de Plomo de 2 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

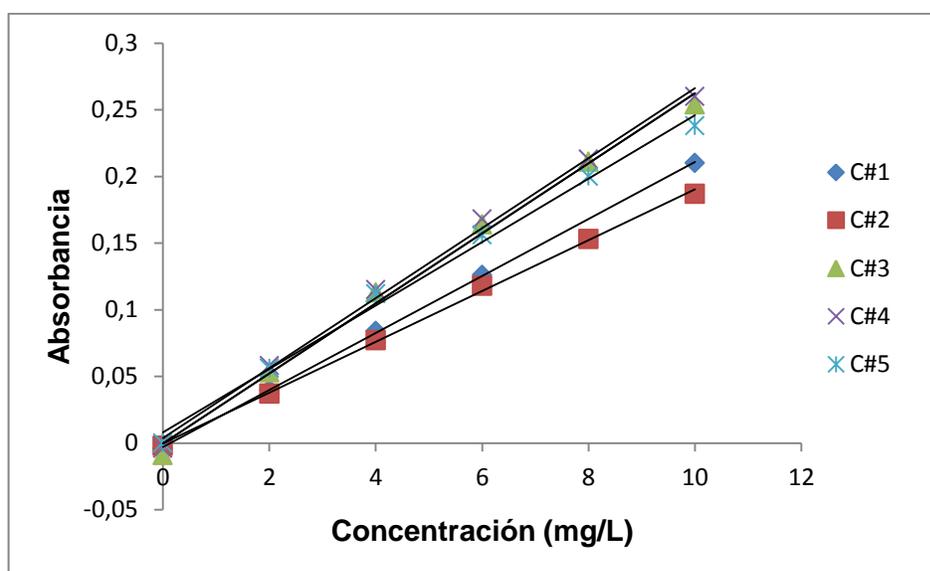
**Tabla 43.** Lecturas de patrón de PLOMO de 2 mg/L

# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	12/04/2013	2,2866
2	14/05/2013	1,7921
3	04/10/2013	2,0304
4	08/04/2013	2,3460
5	07/10/2013	2,0168
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		2,0944
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,2246
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,0741
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,2223

### 6.1.8.2. Curvas de calibración

**Tabla 44.** Curvas de calibración de Plomo (Pb)

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)
0	-0,004	-0,002	-0,009	-0,004	-0,000
2	0,040	0,037	0,053	0,058	0,056
4	0,084	0,077	0,113	0,115	0,112
6	0,126	0,118	0,164	0,168	0,156
8	-	0,153	0,211	0,213	0,200
10	0,210	0,187	0,254	0,260	0,238

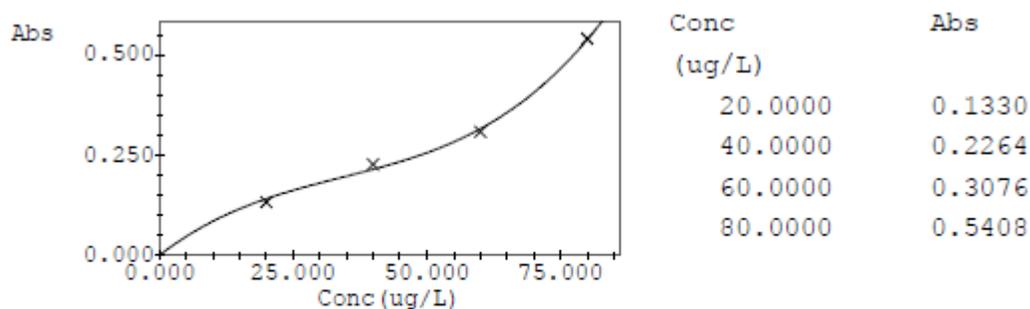


**Figura 42.** Curvas de calibración para Plomo (Pb)

**Tabla 45.** Datos para curvas de calibración de Plomo (Pb)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	12/04/2013	Abs = 0,0157Conc. + 0,0041	0,9998
C#2	14/05/2013	Abs = 0,0178Conc. + 0,0051	0,9976
C#3	04/10/2013	Abs = 0,0263Conc. - 0,0004	0,9946
C#4	08/04/2013	Abs = 0,0263Conc. + 0,0037	0,9961
C#5	07/10/2013	Abs = 0,0238Conc. + 0,0080	0,9941

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#6** (14/11/2013) y es la siguiente:



$$\text{Abs} = 1.9752 \times 10^{-6} \text{Conc}^3 - 0.00020271 \text{Conc}^2 + 0.010311 \text{Conc} + 0.00000$$

$$r = 0.9985$$

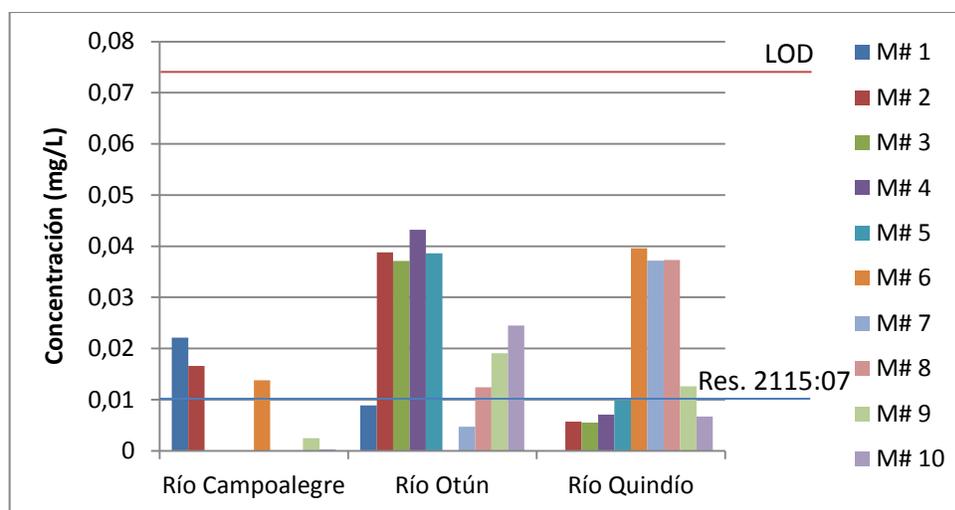
**Figura 43.** Curva de calibración de Plomo C#6 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.8.3. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 46.** Reporte de cuantificación de Plomo en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	0,0221	C#3
	M# 2	RC_MT_02	0,0166	
	M# 3	RC_MT_03	<LOD	
	M# 4	RC_MT_04	<LOD	
	M# 5	RC_MT_05	<LOD	
	M# 6	RC_MT_06	0,0138	
	M# 7	RC_MT_07	<LOD	
	M# 8	RC_MT_08	<LOD	
	M# 9	RC_MT_09	<LOD	
	M# 10	RC_MT_10	<LOD	
Otún	M# 1	RP_MT_01	0,0089	C#1
	M# 2	RP_MT_02	0,0388	C#2
	M# 3	RP_MT_03	0,0371	
	M# 4	RP_MT_04	0,0432	
	M# 5	RP_MT_05	0,0386	
	M# 6	RP_MT_06	<LOD	C#3
	M# 7	RP_MT_07	<LOD	
	M# 8	RP_MT_08	0,0124	
	M# 9	RP_MT_09	0,0191	
	M# 10	RP_MT_10	0,0245	

Quindío	M# 1	RQ_MT_01	<LOD	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	<LOD	
	M# 3	RQ_MT_03	<LOD	
	M# 4	RQ_MT_04	<LOD	
	M# 5	RQ_MT_05	0,0099	C#2
	M# 6	RQ_MT_06	0,0396	
	M# 7	RQ_MT_07	0,0372	
	M# 8	RQ_MT_08	0,0373	
	M# 9	RQ_MT_09	0,0126	C#3
	M# 10	RQ_MT_10	<LOD	



**Figura 44.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Plomo en los diferentes ríos según el número de muestreo

**NOTA ACLARATORIA:** Las concentraciones de las muestras se encuentran bajo el LOD según la **Figura 44.** sin embargo, en la **Tabla 46.** se reportan concentraciones por debajo de este debido al método aplicado, pues estos valores son producto de un tratamiento matemático deductivo que consiste en multiplicar por 0,1 la concentración reportada por el equipo teniendo en consideración la metodología utilizada para preparar las muestras.

#### 6.1.8.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 47.** Reporte de cuantificación de Plomo en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	0,1528	C#6
Sedimento Otún	RP - S	0,2057	
Sedimento Quindío	RQ - S	0,2371	
Cenizas	CVNR	0,1082	

#### OBSERVACIONES

Con respecto a las muestras de agua se obtuvo que:

- ✓ Todos resultados de cada río fueron muy fluctuantes
- ✓ La concentración promedio de plomo en los ríos analizados según el Anexo A está alrededor de 0,03 mg/L, estos valores sobrepasan el máximo establecido en la resolución 2115 de 2007 (Ver **Tabla 2**).

En cuanto a los sedimentos se encontró que ninguna de las muestras superó el límite establecido por los estándares internacionales (Ver **Tabla 5**) estando estos por debajo del valor TEL, lo que indica que están en el rango de efecto **mínimo**, en el que rara vez ocurren efectos adversos en los ecosistemas acuáticos.

En cuanto a las cenizas volcánicas, se requieren en promedio cerca de 9 gramos de este material para elevar la concentración de plomo de 1 litro de agua libre de este metal hasta el máximo establecido por la Resolución 2115:2007 (Según **Anexo A**), esto indica que las cenizas volcánicas representan un peligro moderado de contaminación en el caso hipotético de que todo el contenido de plomo de las cenizas se depositara en la masa de agua.

### 6.1.9. Potasio

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando misma técnica, a través de la cual se posee un límite de detección para Potasio (LOD) **<0,05 mg/L** y un límite de cuantificación (LOC) **<0,1 mg/L**, según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### 6.1.9.1. Límite de detección del equipo

Para hallar el límite de detección de Potasio para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969, se utilizaron las medidas de un patrón de Potasio de 0,3 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

**Tabla 48.** Lecturas de patrón de POTASIO de 0,3 mg/L

# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	20/03/2013	0,3718
2	09/04/2013	0,3294
3	20/05/2013	0,3414
4	13/08/2013	0,2845
5	25/02/2013	0,3459
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		0,3346
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,0320
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,1056
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,3168

#### 6.1.9.2. Curvas de calibración

**Tabla 49.** Curvas de calibración de Potasio (K)

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)	C#6
0,0	0,007	0,002	0,008	0,018	0,002	0,010
0,3	0,051	0,028	0,066	0,064	-	0,072
0,5	0,068	0,040	0,096	0,099	0,086	0,103
1,0	0,109	0,077	0,154	0,166	0,172	0,165
2,0	0,203	0,139	0,256	0,273	0,336	0,290
2,5	-	0,176	0,324	-	-	-

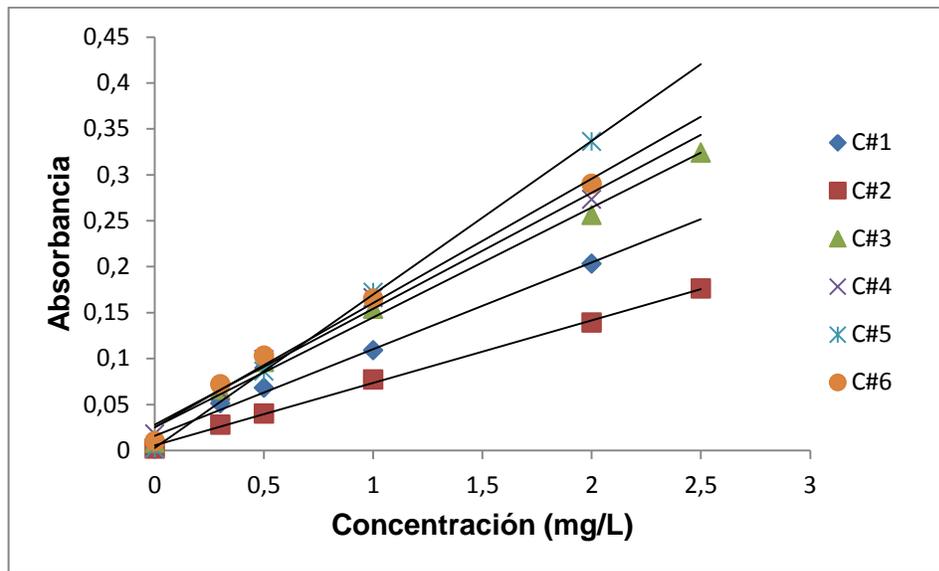
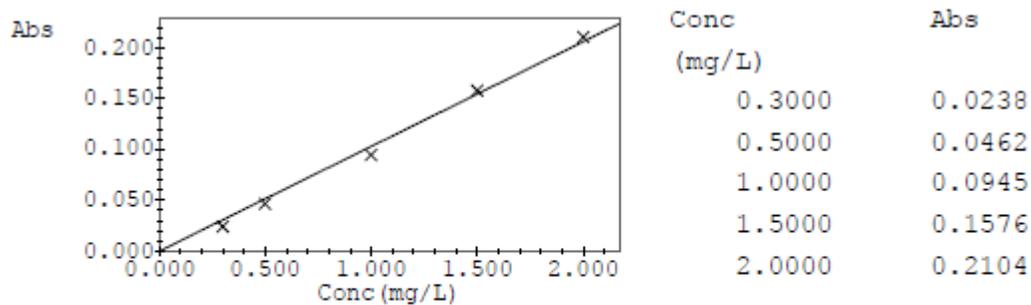


Figura 45. Curvas de calibración para Potasio

Tabla 50. Datos para curvas de calibración de Potasio (K)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	20/03/2013	Abs = 0,0944Conc. + 0,0159	0,9930
C#2	09/04/2013	Abs = 0,0680Conc. + 0,0056	0,9985
C#3	20/05/2013	Abs = 0,1195Conc. + 0,0252	0,9917
C#4	13/08/2013	Abs = 0,1262Conc. + 0,0281	0,9909
C#5	27/11/2013	Abs = 0,1671Conc. + 0,0028	0,9999
C#6	25/02/2013	Abs = 0,1353Conc. + 0,0252	0,9906

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#7** (29/11/2013) y es la siguiente:



$$\text{Abs} = 0.10302\text{Conc} + 0.00000$$

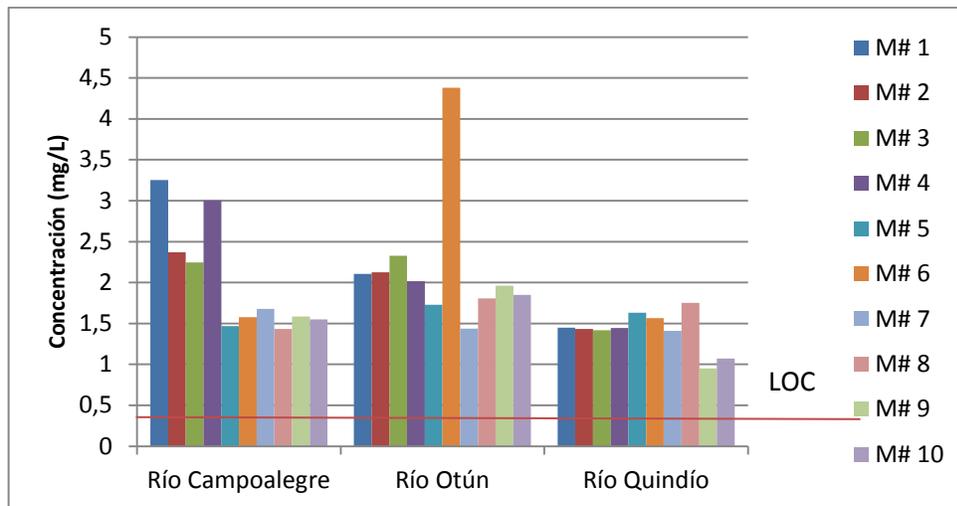
$$r = 0.9992$$

Figura 46. Curva de calibración de Potasio C#7 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.9.3. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 51.** Reporte de cuantificación de Potasio en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	3,2514	C#5
	M# 2	RC_MT_02	2,3705	
	M# 3	RC_MT_03	2,2461	
	M# 4	RC_MT_04	3,0047	
	M# 5	RC_MT_05	1,4699	C#4
	M# 6	RC_MT_06	1,5785	
	M# 7	RC_MT_07	1,6769	
	M# 8	RC_MT_08	1,4319	
	M# 9	RC_MT_09	1,5838	
	M# 10	RC_MT_10	1,5510	
Otún	M# 1	RP_MT_01	2,1046	C#2.
	M# 2	RP_MT_02	2,1270	C#3
	M# 3	RP_MT_03	2,3270	
	M# 4	RP_MT_04	2,0177	
	M# 5	RP_MT_05	1,7282	
	M# 6	RP_MT_06	4,3806	C#5
	M# 7	RP_MT_07	1,4381	C#4
	M# 8	RP_MT_08	1,8068	
	M# 9	RP_MT_09	1,9628	
	M# 10	RP_MT_10	1,8488	
Quindío	M# 1	RQ_MT_01	1,4481	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	1,4339	
	M# 3	RQ_MT_03	1,4190	
	M# 4	RQ_MT_04	1,4456	
	M# 5	RQ_MT_05	1,6305	
	M# 6	RQ_MT_06	1,5658	C#2
	M# 7	RQ_MT_07	1,4100	
	M# 8	RQ_MT_08	1,7515	
	M# 9	RQ_MT_09	0,9520	
	M# 10	RQ_MT_10	1,0702	C#5



**Figura 47.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Potasio en los diferentes ríos según el número de muestreo

#### 6.1.9.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 52.** Reporte de cuantificación de Potasio en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (g/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	0,4679	C#7
Sedimento Otún	RP - S	2,8142	
Sedimento Quindío	RQ - S	2,5393	
Cenizas	CVNR	1,4563	

#### OBSERVACIONES

En cuanto a las concentraciones de Potasio en las muestras de agua se observa que:

- ✓ Las muestras M#1, M#2, M#3, M#4 del río Campoalegre tienen las concentraciones más altas entre las diez (10) muestras analizadas.
- ✓ La muestra M#6 del río Otún obtuvo la concentración más alta entre todas las muestras de los tres (3) ríos.
- ✓ Las concentraciones del río Quindío fueron mucho más uniformes en cuanto a las encontradas en los tres ríos
- ✓ A pesar de encontrarse concentraciones mucho más grandes que el límite de detección, estas no representan un peligro para la salud de las personas. En la Resolución 2115:2007 no se presenta un valor de referencia para este metal.

En cuanto a las muestras de sedimentos se puede observar que las concentraciones de potasio en los ríos Otún y Quindío son las más altas entre los tres ríos estudiados, sin embargo, no existen límites referenciados que puedan afectar la vida acuática respecto a las concentraciones de potasio en sedimentos.

Respecto a la ceniza volcánica, se puede observar que la concentración de potasio presente en ella, representaría un valor intermedio entre las muestras de sedimentos, entendiéndose que este valor no representa algún peligro para la salud de las personas o para los ecosistemas.

#### **6.1.10. Sodio**

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando misma técnica, a través de la cual se posee un límite de detección para Sodio (LOD) **<0,05 mg/L** y un límite de cuantificación (LOC) **<0,1 mg/L**, según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

##### **6.1.10.1. Límite de detección del equipo**

Para hallar el límite de detección de Sodio para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969, se utilizaron las medidas de un patrón de Sodio de 0,3 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

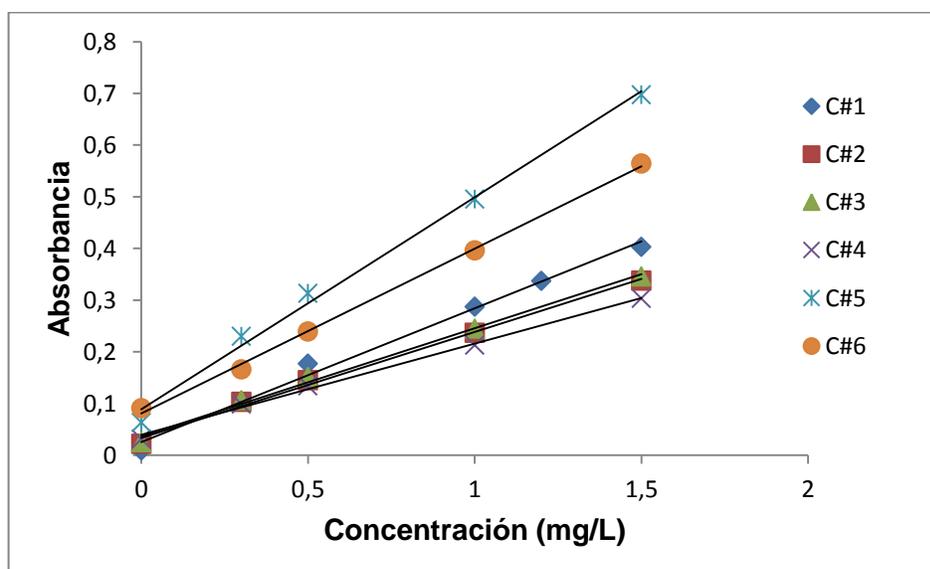
**Tabla 53.** Lecturas de patrón de SODIO de 0,3 mg/L

# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	22/02/2013	0,2675
2	06/05/2013	0,3382
3	07/06/2013	0,3464
4	13/09/2013	0,3375
5	09/10/2013	0,3441
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		0,3267
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,0334
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,1102
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,3307

### 6.1.10.2. Curvas de calibración

**Tabla 54.** Curvas de calibración de Sodio (Na)

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)	C#6 (Abs.)
0	0,009	0,022	0,025	0,031	0,063	0,091
0,3	-	0,103	0,106	0,099	0,230	0,166
0,5	0,177	0,145	0,151	0,134	0,313	0,239
1,0	0,287	0,237	0,245	0,213	0,495	0,396
1,2	0,337	-	-	-	-	-
1,5	0,403	0,338	0,346	0,303	0,697	0,564

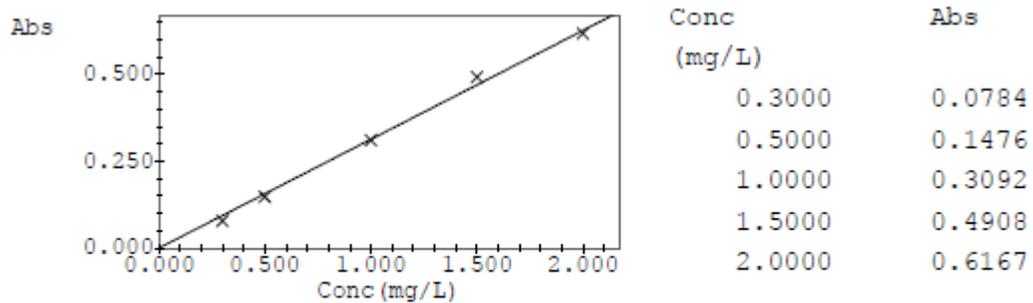


**Figura 48.** Curvas de calibración para Sodio (Na)

**Tabla 55.** Datos para curvas de calibración de Sodio (Na)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	09/04/2013	Abs = 0,2588Conc. + 0,0252	0,9908
C#2	06/05/2013	Abs = 0,2052Conc. + 0,0336	0,9952
C#3	07/06/2013	Abs = 0,2090Conc. + 0,0336	0,9952
C#4	13/09/2013	Abs = 0,1766Conc. + 0,0394	0,9963
C#5	09/10/2013	Abs = 0,4103Conc. + 0,0888	0,9940
C#6	22/02/2013	Abs = 0,3189Conc. + 0,0807	0,9982

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#7** (28/11/2013) y es la siguiente:



$$\text{Abs} = 0.31306 \text{Conc} + 0.00000$$

$$r = 0.9984$$

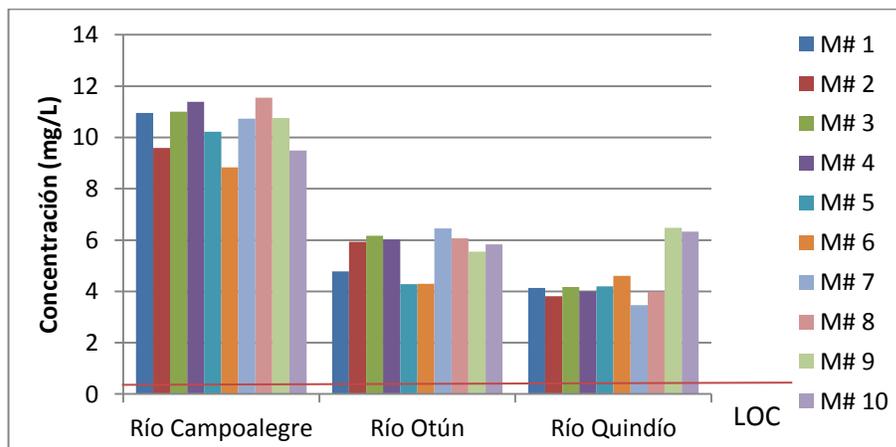
**Figura 49.** Curva de calibración de Sodio C#7 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.10.3. Resultados para análisis de muestras de agua.

**Tabla 56.** Reporte de cuantificación de Sodio en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	10,954	C#3
	M# 2	RC_MT_02	9,595	
	M# 3	RC_MT_03	11,004	
	M# 4	RC_MT_04	11,388	
	M# 5	RC_MT_05	10,219	C#4
	M# 6	RC_MT_06	8,836	
	M# 7	RC_MT_07	10,735	
	M# 8	RC_MT_08	11,550	
	M# 9	RC_MT_09	10,754	
	M# 10	RC_MT_10	9,488	

Otún	M# 1	RP_MT_01	4,784	C#1
	M# 2	RP_MT_02	5,936	C#2
	M# 3	RP_MT_03	6,166	
	M# 4	RP_MT_04	6,013	
	M# 5	RP_MT_05	4,279	
	M# 6	RP_MT_06	4,299	C#5
	M# 7	RP_MT_07	6,452	C#3
	M# 8	RP_MT_08	6,067	C#4
	M# 9	RP_MT_09	5,544	
	M# 10	RP_MT_10	5,835	
Quindío	M# 1	RQ_MT_01	4,132	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	3,809	
	M# 3	RQ_MT_03	4,171	
	M# 4	RQ_MT_04	4,001	
	M# 5	RQ_MT_05	4,194	
	M# 6	RQ_MT_06	4,607	C#2
	M# 7	RQ_MT_07	3,470	
	M# 8	RQ_MT_08	3,982	
	M# 9	RQ_MT_09	6,479	C#3
	M# 10	RQ_MT_10	6,328	



**Figura 50.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Sodio en los diferentes ríos según el número de muestreo

#### 6.1.10.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Ceniza

Tabla 57. Reporte de cuantificación de Sodio en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	25,2363	C#7
Sedimento Otún	RP - S	16,3698	
Sedimento Quindío	RQ - S	13,6265	
Cenizas	CVNR	116,9953	

#### OBSERVACIONES

Las concentraciones de sodio en las muestras de agua de los tres ríos estudiados, presentan uniformidad, sin embargo se tiene en cuenta que:

- ✓ Las muestras del río Campoalegre obtuvieron las concentraciones más altas entre los tres ríos estudiados
- ✓ Las concentraciones de las muestras M#9 y M#10 en el río Quindío obtuvieron una mayor concentración respecto a las otras muestras
- ✓ Las concentraciones de las muestras M#5 y M#6 del río Otún fueron las más bajas.
- ✓ Según la Resolución 2115 de 2007, ninguna muestra de agua representa alguna peligrosidad para la salud humana

En las muestras de sedimentos, al igual que en las de agua, se encontró que las concentraciones de sodio en el río Campoalegre son mayores respecto a los otros ríos estudiados. No se encontraron límites de concentración de sodio en sedimentos que determinen algún impacto sobre ecosistemas acuáticos, sin embargo se debe considerar que las altas concentraciones de sodio en el agua podrían ocasionar un aumento en su pH, así como se describe en el apartado **4.2.2.10.**

Respecto a las cenizas volcánicas, se puede observar que la concentración de sodio presente en ellas, tienen un valor muy elevado en comparación con las muestras de sedimentos, sin embargo, al no tener un límite establecido para este

metal, se desconoce el impacto que pueda tener sobre los ecosistemas acuáticos y la salud de las personas.

### 6.1.11. Zinc

Las lecturas para este metal en muestras de agua fueron realizadas en el equipo UNICAM SOLAAR 969 mediante la técnica de EAA de llama aire-acetileno; entre tanto, las lecturas de muestras de sedimentos y cenizas se ejecutaron en el equipo SHIMADZU AA-7000 Series usando misma técnica, a través de la cual se posee un límite de detección para Zinc (LOD) **<0,05 mg/L** y un límite de cuantificación (LOC) **<0,1 mg/L**, según variables determinadas por el Laboratorio de Aguas y Alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira.

#### 6.1.11.1. Límite de detección del equipo

Para hallar el límite de detección de zinc para las mediciones realizadas en el espectrofotómetro de absorción atómica UNICAM SOLAAR 969, se utilizaron las medidas de un patrón de Zinc de 0,1 mg/L, obteniendo los siguientes valores de concentración:

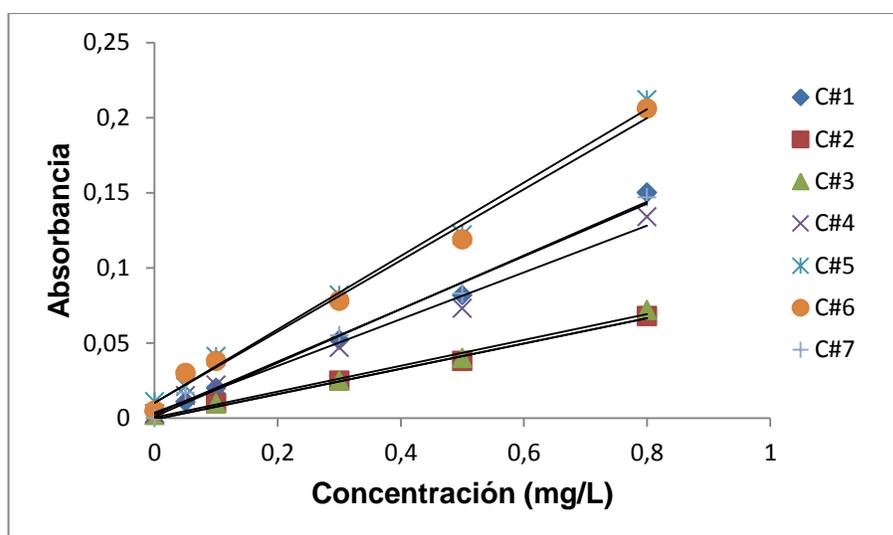
**Tabla 58.** Lecturas de patrón de ZINC de 0,1 mg/L

# LECTURA	FECHA	CONCENTRACIÓN (mg/L)
1	20/03/2013	0,1058
2	08/05/2013	0,1284
3	07/06/2013	0,1093
4	27/09/2013	0,1183
5	07/10/2013	0,1257
6	16/10/2013	0,1170
<b>PROMEDIO (<math>\bar{X}</math>)</b>		0,1174
<b>DESV. ESTANDAR (s)</b>		0,0088
<b>LIM. DE DETECCIÓN (LOD)</b>		0,0290
<b>LIM. DE CUANTIFICACIÓN (LOC)</b>		0,0871

### 6.1.11.2. Curvas de calibración

**Tabla 59.** Curvas de calibración de Zinc

PATRÓN (mg/L)	C#1 (Abs.)	C#2 (Abs.)	C#3 (Abs.)	C#4 (Abs.)	C#5 (Abs.)	C#6 (Abs.)	C#7 (Abs.)
0	0,004	-0,002	0,002	0,003	0,011	0,005	0,000
0,05	0,011	0,008	-	0,015	0,021	0,030	0,017
0,1	0,020	0,010	0,010	0,022	0,041	0,038	-
0,3	0,052	0,025	0,025	0,047	0,082	0,078	0,055
0,5	0,082	0,038	0,040	0,073	0,122	0,119	0,083
0,8	0,150	0,068	0,072	0,134	0,212	0,206	0,147

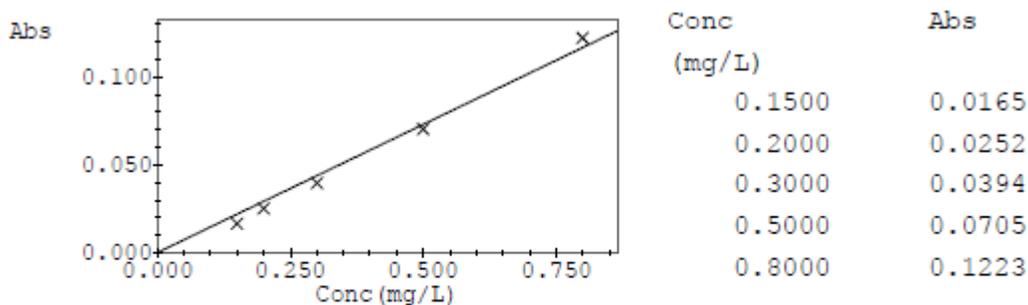


**Figura 51.** Curvas de calibración para Zinc (Zn)

**Tabla 60.** Datos para curvas de calibración de Zinc (Zn)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	20/03/2013	Abs = 0,1786Conc. + 0,0011	0,9920
C#2	16/04/2013	Abs = 0,0841Conc. - 0,0008	0,9931
C#3	08/05/2013	Abs = 0,0860Conc. + 0,0006	0,9921
C#4	07/06/2013	Abs = 0,1556Conc. + 0,0036	0,9883
C#5	27/09/2013	Abs = 0,2442Conc. + 0,0103	0,9933
C#6	16/10/2013	Abs = 0,2368Conc. + 0,0103	0,9908
C#7	07/10/2013	Abs = 0,1758Conc. + 0,0025	0,9920

La curva sobre la cual se trabajaron las cenizas y los sedimentos fue llamada **C#8** (27/11/2013) y es la siguiente:



$$\text{Abs} = 0.14621 \text{Conc} + 0.00000$$

$$r = 0.9995$$

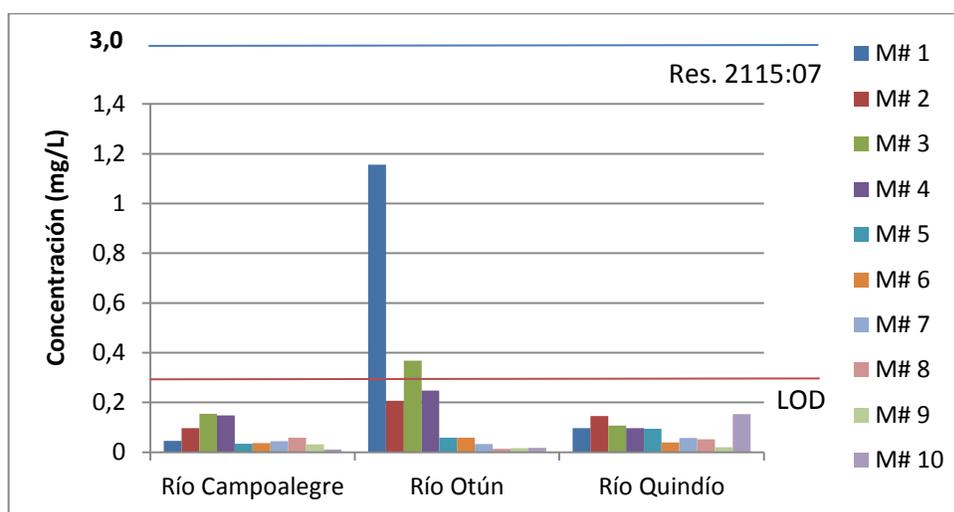
**Figura 52.** Curva de calibración de Zinc C#8 para cenizas y sedimentos.

### 6.1.11.3. Resultados para análisis de muestras de agua

**Tabla 61.** Reporte de cuantificación de Zinc en aguas

Río	Muestreo	Código	Concentración (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_MT_01	0,0451	C#4
	M# 2	RC_MT_02	0,0965	
	M# 3	RC_MT_03	0,1546	
	M# 4	RC_MT_04	0,1479	
	M# 5	RC_MT_05	0,0339	C#5
	M# 6	RC_MT_06	0,0365	
	M# 7	RC_MT_07	0,0447	
	M# 8	RC_MT_08	0,0589	
	M# 9	RC_MT_09	0,0322	
		M# 10	RC_MT_10	<LOD
Otún	M# 1	RP_MT_01	1,1564	C#2
	M# 2	RP_MT_02	0,2068	C#3
	M# 3	RP_MT_03	0,3676	
	M# 4	RP_MT_04	0,2484	
	M# 5	RP_MT_05	0,0579	
	M# 6	RP_MT_06	0,0579	C#7
	M# 7	RP_MT_07	0,0328	C#4
	M# 8	RP_MT_08	<LOD	C#6
	M# 9	RP_MT_09	<LOD	
	M# 10	RP_MT_10	<LOD	

Quindío	M# 1	RQ_MT_01	0,0969	C#1
	M# 2	RQ_MT_02	0,1456	
	M# 3	RQ_MT_03	0,1071	
	M# 4	RQ_MT_04	0,097	
	M# 5	RQ_MT_05	0,0949	
	M# 6	RQ_MT_06	0,0395	C#3
	M# 7	RQ_MT_07	0,0572	
	M# 8	RQ_MT_08	0,0516	
	M# 9	RQ_MT_09	<LOD	C#4
	M# 10	RQ_MT_10	0,1527	



**Figura 53.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Zinc en los diferentes ríos según el número de muestreo

#### 6.1.11.4. Resultados para análisis de Sedimentos y Cenizas

**Tabla 62.** Reporte de cuantificación de Zinc en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	1,4515	C#8
Sedimento Otún	RP - S	0,4414	
Sedimento Quindío	RQ - S	1,2876	
Cenizas	CVNR	0,4534	

## OBSERVACIONES

Las concentraciones de Zinc en las muestras de agua arrojaron valores muy cercanos al límite de detección de la técnica, sin embargo, hubo resultados muy variados en las muestras del agua del río Otún; cabe anotar que la muestra M#1 obtuvo el resultado más alto entre todas las muestras analizadas. Las concentraciones reportadas para el río Campoalegre fueron las más bajas entre los tres ríos estudiados. El río Quindío obtuvo pequeñas variaciones entre todos sus resultados. Teniendo en cuenta la Resolución 2115 de 2007 no existe un límite máximo de concentraciones que afecten la calidad de vida de las personas de forma directa, aunque según el artículo 7 de esta misma resolución, ninguna muestra causaría efectos económicos o indirectos sobre la salud humana al no superar el máximo establecido para este metal (Ver **Tabla 4**).

En cuanto a las muestras de sedimentos se puede observar que las concentraciones de Zinc en los ríos Campoalegre y Quindío son las más altas entre los tres ríos estudiados y, según los estándares internacionales, estas concentraciones no son suficientes para afectar los ecosistemas acuáticos de estos ríos.

Respecto a la ceniza volcánica, se puede observar que las concentraciones de zinc presentes en ellas, son tan bajas que requerirían una gran cantidad de este material para elevar la concentración de cualquiera de los ríos hasta el máximo establecido en la resolución 2115:2007. (Ver **Anexo A**)

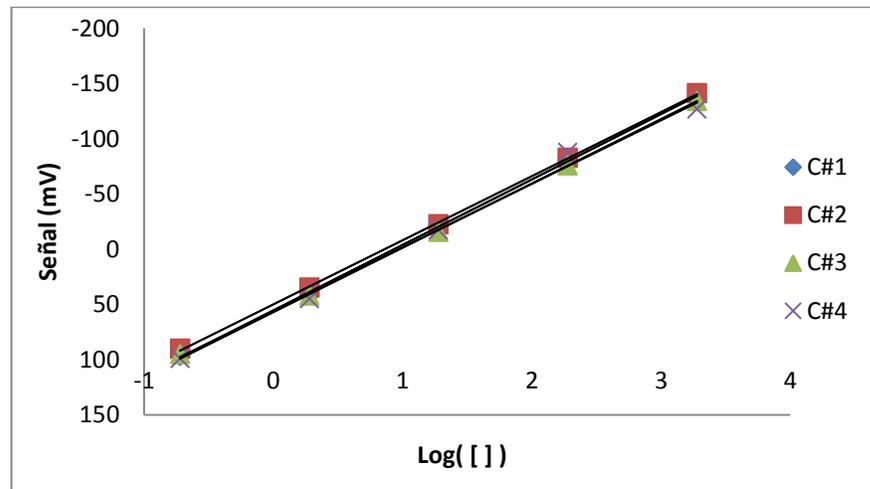
### **6.2. DETERMINACIÓN DE FLUORUROS EN MUESTRAS DE AGUA, SEDIMENTOS Y CENIZAS VOLCÁNICAS POR MÉTODO POTENCIOMÉTRICO.**

Esta técnica presenta un límite de detección (LOD) de **113,4925 mV**, relativo a la señal y un límite de cuantificación (LOC) de **0,00017 mg/L**, relativo a la concentración. Estos valores fueron proporcionados por la persona encargada de la operación del equipo y fueron utilizados para evaluar las concentraciones halladas en las diferentes muestras de agua, sedimentos y cenizas que se reportan en **6.2.2. y 6.2.3.**

### 6.2.1. Curvas de calibración

**Tabla 63.** Curvas de calibración para fluoruros

PATRÓN (mg/L)	Log([ ])	C#1 (mV)	C#2 (mV)	C#3 (mV)	C#4 (mV)
1900	3,278753601	-137,8	-141,2	-134,1	-126,7
190	2,278753601	-82,1	-82,8	-75,8	-87,5
19	1,278753601	-20,9	-22,4	-15,6	27,3
1,9	0,278753601	41,4	34,9	42,2	44,9
0,19	-0,721246399	96,9	90,3	95,0	99,3



**Figura 54.** Curvas de calibración para cuantificación de fluoruros

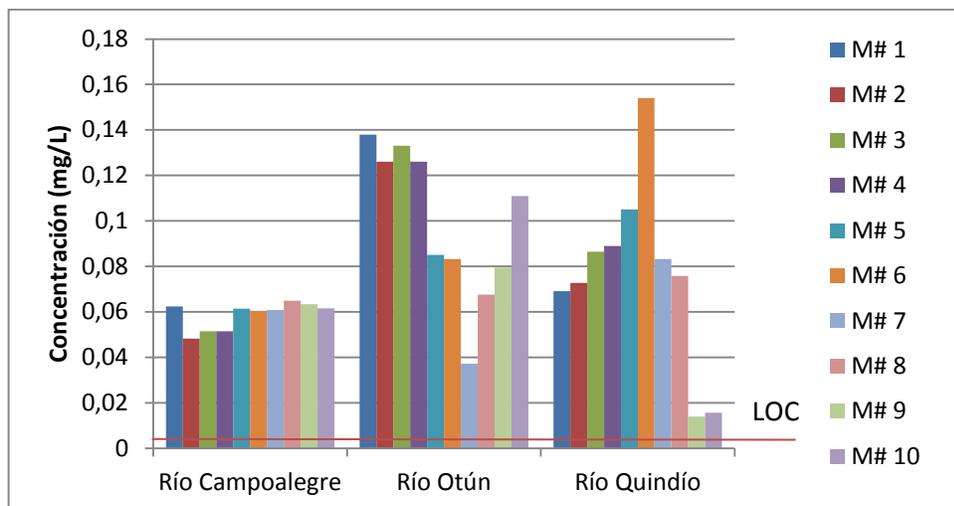
**Tabla 64.** Datos para curvas de calibración de fluoruros (F<sup>-</sup>)

CURVA	FECHA	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>
C#1	13/05/13	Señal = - 59,29Log( [ ] ) + 55,317	0,9996
C#2	08/07/13	Señal = - 58,07Log( [ ] ) + 50,017	0,9998
C#3	21/10/13	Señal = - 57,62Log( [ ] ) + 56,022	0,9995
C#4	12/12/13	Señal= - 58,44Log( [ ] ) + 57,270	0,9939

## 6.2.2. Resultados de cuantificación de fluoruros en muestras de agua.

**Tabla 65.** Reporte de cuantificación de fluoruros en muestras de agua

RÍO	MUESTREO	CÓDIGO	CONCENTRACIÓN F <sup>-</sup> (mg/L)	Curva
Campoalegre	M# 1	RC_FL_01	0,0624	C#1
	M# 2	RC_FL_02	0,0482	
	M# 3	RC_FL_03	0,0514	
	M# 4	RC_FL_04	0,0514	
	M# 5	RC_FL_05	0,0614	C#2
	M# 6	RC_FL_06	0,0604	
	M# 7	RC_FL_07	0,0609	
	M# 8	RC_FL_08	0,0649	
	M# 9	RC_FL_09	0,0634	
	M# 10	RC_FL_10	0,0615	
Otún	M# 1	RC_FL_01	0,1380	C#1
	M# 2	RP_FL_02	0,1260	C#2
	M# 3	RP_FL_03	0,1330	
	M# 4	RP_FL_04	0,1260	
	M# 5	RP_FL_05	0,0851	
	M# 6	RP_FL_06	0,0832	
	M# 7	RP_FL_07	0,0372	
	M# 8	RP_FL_08	0,0675	C#3
	M# 9	RP_FL_09	0,0795	
	M# 10	RP_FL_10	0,1110	
Quindío	M# 1	RQ_FL_01	0,0691	C#1
	M# 2	RQ_FL_02	0,0727	
	M# 3	RQ_FL_03	0,0864	
	M# 4	RQ_FL_04	0,0889	
	M# 5	RQ_FL_05	0,1050	
	M# 6	RQ_FL_06	0,1540	C#2
	M# 7	RQ_FL_07	0,0832	
	M# 8	RQ_FL_08	0,0758	C#3
	M# 9	RQ_FL_09	0,0140	
	M# 10	RQ_FL_10	0,0156	



**Figura 55.** Gráfica de comportamiento de la concentración de Fluoruros en los diferentes ríos según el número de muestreo

### 6.2.3. Resultados de cuantificación de fluoruros en muestras de Sedimentos y cenizas.

**Tabla 66.** Reporte de cuantificación de fluoruros en Sedimentos y Cenizas

Muestra	Código	Concentración (mg/100g)	Curva
Sedimento Campoalegre	RC - S	0,2193	C#4
Sedimento Otún	RP - S	0,3144	
Sedimento Quindío	RQ - S	1,3803	
Cenizas	CVNR	22,7681	

#### OBSERVACIONES:

De acuerdo a la **Figura 55.** y al **6.4.**, las muestras de agua presentaron todas, sin excepción, concentraciones muy bajas con respecto al máximo establecido en la

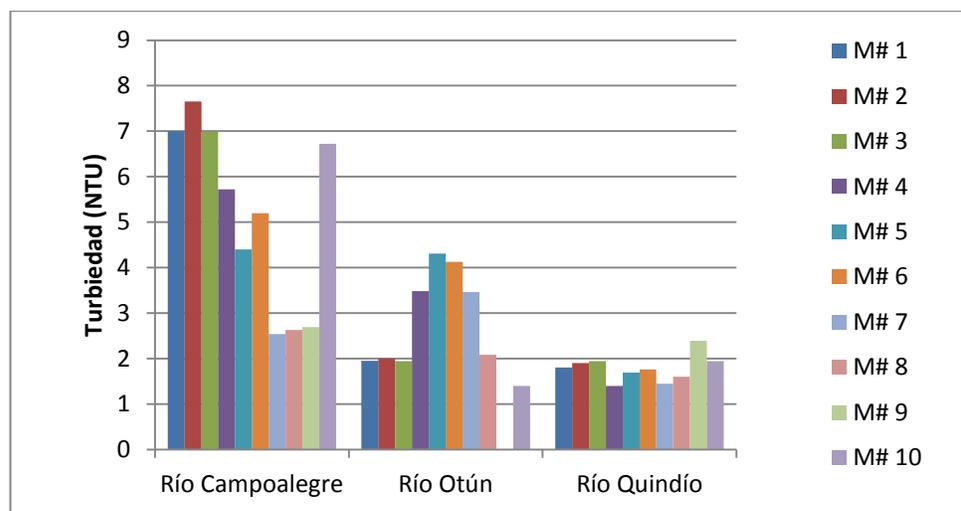
Resolución 2115:2007 (Ver **Tabla 3**), de igual manera, se observaron bajas concentraciones en los sedimentos de los tres ríos estudiados.

En cuanto a las cenizas volcánicas, se encontró una muy alta concentración de fluoruros, casi 20 veces más alta que la del sedimento que presentó mayor concentración. Esto implica con una pequeña cantidad de cenizas (3 gramos) se pueda contaminar un litro de agua de cualquiera de los ríos estudiados. (Este cálculo se puede efectuar haciendo uso de la fórmula que se presenta en el **Anexo A**).

### 6.3. DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD EN MUESTRAS DE AGUA.

**Tabla 67.** Turbiedad de las muestras estudiadas

Código	Turbiedad (NTU)		
	R. Campoalegre	R. Otún	R. Quindío
RC_FL_01	7,00	1,95	1,80
RC_FL_02	7,65	2,00	1,90
RC_FL_03	6,99	1,94	1,94
RC_FL_04	5,72	3,48	1,40
RC_FL_05	4,40	4,31	1,69
RC_FL_06	5,20	4,13	1,76
RC_FL_07	2,54	3,46	1,45
RC_FL_08	2,63	2,08	1,60
RC_FL_09	2,69	1,46	2,39
RC_FL_10	6,72	1,40	1,94



**Figura 56.** Gráfica de comportamiento de la turbiedad en las muestras de los ríos analizadas.

## OBSERVACIONES

Tal como se observa en la **Tabla 66**. Los valores de turbiedad en el río Campoalegre varían en mayor medida en comparación a los datos obtenidos en los ríos Otún y Quindío; esto es posible debido a que este afluente atraviesa un bosque húmedo, lo que implica que en la zona hayan numerosas precipitaciones que aumentan el nivel del agua y en consecuencia provocan el arrastre de mayor cantidad de material particulado, incrementando el valor de la turbiedad.

Del río Quindío se obtuvieron los menores resultados de turbiedad (ver **Tabla 66**), seguido por los resultados del río Otún; estos datos muestran que el agua de los afluentes en cuestión no ha sido afectada significativamente por la lluvia o por alguna intervención humana.

**6.4. PROMEDIO DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES ESTUDIADOS, FLUORUROS Y TURBIEDAD EN EL AGUA DE LOS RÍOS CAMPOALEGRE, OTÚN Y QUINDÍO.**

**Tabla 68.** Concentración promedio de metales estudiados en muestras de agua de los ríos Campoalegre, Otún y Quindío

Metal	Res. 2115:07 (mg/L)	Concentración promedio (mg/L)		
		Río Campoalegre	Río Otún	Río Quindío
Arsénico (As)	0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cadmio (Cd)	0,003	0,0563 ± 0,0224	0,0854 ± 0,0297	0,0621 ± 0,0329
Cobre (Cu)	1,0	0,0723 ± 0,0398	0,0783 ± 0,0511	0,0237 ± 0,0110
Cromo (Cr)	0,05	0,0464 ± 0,0397	0,0502 ± 0,0144	<0,04
Magnesio (Mg)	36	7,8385 ± 1,2983	4,6507 ± 0,7691	4,0347 ± 0,3643
Mercurio (Hg)	0,001	0,0011 ± 0,0005	1,2351 ± 0,6917	0,0012 ± 0,0008
Níquel (Ni)	0,02	0,2541 ± 0,3226*	0,0083 ± 0,0087*	0,0186 ± 0,0222*
Plomo (Pb)	0,01	0,0317 ± 0,0285	0,0330 ± 0,0198	0,0351 ± 0,0232
Potasio (K)	-	2,0165 ± 0,6693	2,1742 ± 0,8130	1,4127 ± 0,2399
Sodio (Na)	-	10,4523 ± 0,8906	5,5375 ± 0,7938	4,5173 ± 1,0360
Zinc (Zn)	3	0,0679 ± 0,0481	0,2270 ± 0,3787**	0,0872 ± 0,0424

\* El alto valor de la desviación estándar, en comparación al promedio, refleja una amplia variación en los resultados obtenidos por las muestras de agua cuando son tratados estadísticamente con el límite de detección de la técnica (LOD)

\*\* El alto valor de la desviación estándar, en comparación al promedio, refleja una amplia variación en los resultados obtenidos por las muestras de agua cuando son tratados estadísticamente con todos los resultados que estuvieron por encima del límite de detección (LOD)

**Tabla 69.** Concentración promedio de fluoruros presentes en el agua de los ríos Campoalegre, Otún y Quindío en mg/L

<b>Res. 2115:07 (mg/L)</b>	<b>Río Campoalegre</b>	<b>Río Otún</b>	<b>Río Quindío</b>
1,0	0,0586 ± 0,0059	0,0986 ± 0,0332	0,0765 ± 0,0406

**Tabla 70.** Promedio de las turbiedades de las muestras de agua de los ríos Campoalegre, Otún y Quindío en NTU

<b>Río Campoalegre</b>	<b>Río Otún</b>	<b>Río Quindío</b>
5,15±1,99	2,75±1,09	1,79±0,29

## 7. CONCLUSIONES

- ✓ A pesar de la aleatoriedad en la toma de muestras, los metales Sodio, potasio, Zinc, Magnesio y Cobre, mostraron uniformidad en los resultados obtenidos. Sin embargo, los demás metales, al encontrarse en concentraciones tan bajas, sus resultados puede presentar mayores fluctuaciones.
- ✓ Se encontraron muestras de agua que presentan concentraciones que sobrepasan los valores máximos establecidos en la Resolución 2115:2007. en metales como: **Cadmio** (Mayoría de muestras de todos los ríos), **Cromo** (R. Campoalegre : M#2; R. Otún: M#4), **Mercurio** (R. Campoalegre: M#1; R. Otún: M#1, M#2, M#4, M#5 y M#7; R. Quindío: M#1 y M#7), **Níquel** (R. Campoalegre: M#1 y M#6) y **Plomo** (R. Campoalegre: M#1, M#2 y M#6; R. Otún: M#2, M#3, M#4, M#5, M#8, M#9 y M#10) ; R. Quindío: M#6, M#7, M#8 y M#9).
- ✓ En cuanto a los promedio del apartado **6.4. (Línea base)**, se puede entender que los altos valores en las desviaciones estándar se deben al carácter variable de la matriz analizada.
- ✓ Se encontró que las concentraciones de Mercurio y Níquel en los sedimentos del río Campoalegre y Quindío y Cobre y Mercurio en los sedimentos del río Otún, están dentro del rango **Posible** en el que de vez en cuando se presentan efectos adversos en los ecosistemas acuáticos, según estándares internacionales. Los demás metales estudiados presentaron concentraciones bajas que no representan peligro alguno para dichos ecosistemas.
- ✓ En las cenizas volcánicas se encontró que las concentraciones de Cromo, Níquel, Arsénico, Mercurio y Plomo representan potencial riesgo de contaminación ya que se requieren pocos kilogramos de este material para contaminar un metro cúbico de agua independientemente del río de interés, asumiendo una completa solubilidad de los metales en esta matriz.
- ✓ Se obtuvieron muy bajas concentraciones de fluoruros en las muestras de agua estudiadas con respecto al máximo establecido en la Resolución 2115:2007; esto mismo sucedió en los sedimentos, sin embargo, se encontró que las cenizas volcánicas poseen un muy alto contenido de este ión, por lo que solo basta tener cerca de 3 kilogramos de este material para hacer que el agua de cualquiera de los ríos estudiados alcance el máximo permitido en la resolución anteriormente mencionada.

- ✓ Aunque se presentaron diferentes valores de turbiedad en los diferentes ríos, se encontró que estos no son determinantes al momento de cuantificar los metales presentes en las muestras de agua, al menos en el rango de turbiedades obtenidas, que no supera los 7 NTU.

## 8. RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar un estudio exhaustivo de metales y otros parámetros que permitan verificar el estado real del río Campoalegre e inferir las posibles causas de los altos valores hallados en algunas lecturas de Cromo, Mercurio, Níquel y Plomo y los aumentos progresivos en la concentración de Cadmio y cobre. Verificar su relación con las prácticas agrícolas que se efectúan en los alrededores del afluente.
- ✓ Realizar un estudio de la solubilidad de las cenizas volcánicas en agua para verificar el impacto que puede causar su incursión en los cuerpos de agua estudiados y así poder ajustar los datos que se presentan en el **Anexo A**.
- ✓ Realizar un estudio de la variación del pH con respecto a las concentraciones de sodio en el agua con el fin de establecer el impacto que podría tener la incursión de cenizas volcánicas en cuerpos de agua superficiales.
- ✓ Realizar un estudio más minucioso de la concentración de mercurio en los ríos Quindío y Otún, ya que hay serios indicios de contaminación por este metal, corroborados por las altas concentraciones de este metal en los sedimentos y muestras de agua analizadas.
- ✓ Replicar el presente trabajo en diferentes tramos de cada uno de los ríos, aguas arriba de las bocatomas.

## ANEXOS

### ANEXO A.

*(Fórmula para la determinación de la masa ideal de cenizas volcánicas requerida en la contaminación con metales de las aguas de los ríos Campoalegre, Otún y Quindío)*

$$M_c = (C_s - \bar{C}) * \frac{100}{C_c}$$

$\bar{C}$  = Concentración promedio del metal en cuestión en el río de interés según Apartado 6.4.. (mg/L)

$C_s$  = Concentración máxima aceptable por Resolución 2115:2007 (mg/L)

$C_c$  = Concentración del metal en la ceniza volcánica (mg/100g)

$M_c$  = Masa de ceniza volcánica requerida para contaminar 1 m<sup>3</sup> de agua del río de interés (kg)

#### Condiciones:

- ✓ Si el valor de  $\bar{C}$  es menor que el LOC o LOD (Según se haya reportado), se asume la menor cantidad posible del metal en cuestión que pueda existir en el agua del río de interés, es decir, cero miligramos.
- ✓ Si el valor de  $\bar{C}$  es mayor que  $C_s$ , se asume que el agua del río de interés ya cuenta con una importante concentración del metal en cuestión por lo que no se requeriría alguna cantidad de cenizas para contaminarla. De esta forma,  $M_c$  se reporta de igual manera que en el caso anterior.
- ✓ Para Sodio y Potasio no es posible calcular  $M_c$  ya que no se cuenta con un valor de referencia.

Valores para  $M_c$  según ríos estudiados y metales en cuestión

Metal	Valor de $M_c$ (kg)		
	R. Campoalegre	R. Otún	R. Quindío
Arsénico (As)	8,39	8,39	8,39
Cadmio (Cd)	25,86	25,86	25,86
Cobre (Cu)	40,88	40,62	43,02
Cromo Total (Cr)	1,74	24,20	24,20
Magnesio (Mg)	10,52	11,72	11,94
Mercurio (Hg)	10,64	10,64	10,64
Níquel (Ni)	1,66	0,97	0,1164
Plomo (Pb)	9,24	9,24	9,24
Potasio (K)	-	-	-
Sodio (Na)	-	-	-
Zinc (Zn)	646,69	611,60	642,43

**NOTA ACLARATORIA:**

El valor de  $M_c$  calculado corresponde a una aproximación de la masa ideal de ceniza volcánica requerida para contaminar  $1 \text{ m}^3$  de agua en las condiciones actuales, asumiendo solubilidad completa, sin embargo, este valor en condiciones reales debería variar con respecto al tramo del afluente que esté siendo afectado, debido a la acumulación que se presentaría a medida que una sección de agua se desplaza.

D

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] SGC. Boletines informativos, Reportes mensuales de actividad (2006-2013), Generalidades VNR, registros fotográficos. Recuperado en noviembre de 2013 del sitio web del Sistema Geológico Colombiano: <http://www.sgc.gov.co>
- [2] Smichowski, P., Gómez, D., Rosa, S., & Polla, G. (2003). Trace elements content in size-classified volcanic ashes as determined by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Microchemical Journal* 75, 109-117.
- [3] Smithsonian Institution National Museum of Natural History. Global Volcanism Program: Nevado del Ruiz, Colombia. Recuperado en noviembre de 2013 del sitio web del Museo Nacional de Historia Natural del instituto Smithsonian en la página: <http://www.volcano.si.edu/>
- [4] Rayo, L. (2012). Evolución geoquímica y térmica del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- [5] Toro, L. M., Borrero, C.A., & Ayala, L. F. (2010). Petrografía y Geoquímica de las Rocas Ancestrales del Volcán Nevado del Ruiz. *Boletín de Geología* 32, 95 – 105.
- [6] Huggel, C., Ceballos, J. L., Pulgarín, B., Ramirez J., & Thouret, J-C. (2007) Review and reassessment of hazards owing to volcano-glacier interactions in Colombia. *Annals of Glaciology* 45. 128-136
- [7] Thouret, J-C., Cantagrel, J.M., Salinas, R., & Murcia, A. (1990). Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 41, 225-251.
- [8] Velásquez, A., Hermelin, M., & Bustamante, M. (1986). Actividad del Volcán Nevado del Ruiz en épocas históricas. *Boletín de Vías* 13 no. 59, 64-81.
- [9] Miletì, D. S., Bolton, P. A., Fernandez, G., & Updike, R. G. (1991) - The Eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, South América, November 13, 1985. *Natural Disaster Studies* 4. National Academy Press,
- [10] Hermelin, M., Velásquez, A., & Bustamante, M. (1986). Aspectos históricos de erupciones en el volcán - Nevado del Ruiz. *Boletín de Vías* 13 no. 56, 18-38.
- [11] Duque Escobar, Gonzalo. (2010). *Armero 25 años... el desastre y la erupción del Ruiz de 1985: las lecciones del Ruiz a los 25 años del desastre de Armero*. en: Conmemoración 25 años de la erupción del Volcán Nevado del Ruiz : lecciones aprendidas, 8, 9 y 10 de Nov de 2010., Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

[12] Redacción El Tiempo. (1989). El Ruiz Amenaza de nuevo. *El Tiempo*. 1A, 7B. Recuperado en noviembre de 2013 del sitio web del archivo digital de El Tiempo: <http://www.eltiempo.com/archivo/>

[13] Redacción El Tiempo. (2012). Continua emisión de cenizas y actividad sísmica activa, entre los hechos más relevantes registrados. *El Tiempo*. Edición digital. Recuperado en noviembre de 2013 de los archivos del eje cafetero del sitio web de El tiempo: <http://www.eltiempo.com/colombia/eje-cafetero/>

[14] Smithsonian Institution National Museum of Natural History. (2012). Volcanic Activity Reports. *Bulletin of the Global Volcanism Network* 37 no. 8, 1-9.

[15] Montenegro, R., Azzinnari N. (2011). Las cenizas volcánicas no son inofensivas – Informe completo, Argentina. Informe sobre los efectos de las cenizas volcánicas sobre la salud y el ambiente con sugerencias para que las personas y gobiernos actúen en forma preventiva. Universidad Nacional de Cordoba, Cordoba, Argentina.

[16] Stewart C., Johnston D.M., Leonard G.S., Horwell C.J., Thordarson T., Cronin S.J. (2006). Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 158, 296–306.

[17] U.S. Geological Survey. (2009) Minerals Yearbook Volume I – Metals and Minerals, Estados Unidos. Recuperado en noviembre de 2013 del sitio web del U.S. Geological Survey en la página: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html>.

[18] Farnfield H.R., Marcilla A.L., Ward N.I. (2012) Arsenic speciation and trace element analysis of the volcanic río Agrio and the geothermal waters of Copahue, Argentina. *Journal Science of the Total Environment* 433, 371–378.

[19] Wan W., Pepping T.J., Banerji T., Chaudhari S., Giammar D.E. (2011) Effects of water chemistry on arsenic removal from drinking water by Electrocoagulation. *Journal water research* 45, 384 – 392.

[20] Wright J. (2003) *Environmental Chemistry*. Primera edición. Editorial Taylor & Francis Ltd, 419 páginas.

[21] ToxFAQs™. (2012) Cadmio. Recuperado de internet en Noviembre de 2013 del sitio web de la División de Toxicología y Ciencias de la Salud en la página: [http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts5.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.html)

[22] Dozier M.C, McFarland M., Lesikar B.J(2006) Problemas del agua potable: El cobre. *Journal Water and Earth's Resources* L-5472S, 01-06.

[23] Cole P., Rodu B.(2005) Epidemiologic studies of chrome and cancer mortality: A series of meta-analyses. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 43, 225–231.

- [24] Pérez E., Carril U. (2009). Fotosíntesis: Aspectos Básicos. Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal. 20, 1-47
- [25] Ito R., Kawaguchi M., Sakui N., Honda H., Okanouchi N., Saito K., Nakazawa H. (2008) Mercury speciation and analysis in drinking water by stir bar sorptive extraction with in situ propyl derivatization and thermal desorption–gas chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1209, 267–270.
- [26] Greenwood N.N, Earnshaw A. (1997). *Chemistry of the elements*. Editorial Butterworth-Heinemann. Segunda edición. Boston, Massachusetts. 1344 páginas
- [27] Museo Geológico Virtual (1997) *Minerales*. Recuperado de internet en noviembre de 2013 del Museo Geológico Virtual de Venezuela del sitio web: <http://www.pdv.com/lexico/museo/museo.htm>.
- [28] Limo U. (2003) Estudio sobre la presencia del plomo en el medio ambiente de Talara en el año 2003. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
- [29] Kim E.J., Herrera J.E., Huggins D., Braam J., Koshowski S. (2011) Effect of pH on the concentrations of lead and trace contaminants in drinking water: A combined batch, pipe loop and sentinel home study. *Water research* 45, 2763 – 2774
- [30] McDorman K.S., Pachkowski B.P., Nakamura J., Wolf D.C., Swenberg J.A. (2005) Oxidative DNA damage from potassium bromate exposure in Long-Evans rats is not enhanced by a mixture of drinking water disinfection by-products. *Chemico-Biological Interactions*, 152, 107-117.
- [31] DiNicolantonio J.J., PharmD, Niazi A.K., Sadaf R., O' Keefe J.H., MD, Lucan S.C., MD, MPH, MS, Lavie C.J., MDe,f (2013). Dietary Sodium Restriction: Take It with a Grain of Salt. *The American Journal of Medicine*, 126, 951 – 955
- [32] Bayer Material Science (2012) Resumen de Seguridad de Producto para Hidróxido de Sodio. Ficha de seguridad. Recuperado de internet en Noviembre de 2013 del Bayer MaterialScience product safety first del sitio web: <http://www.productsafetyfirst.bayer.com>
- [33] Chrosniak, L.D., Smith L.N., McDonald C.G., Jones B.F., Flinn J.M. (2006) Effects of enhanced zinc and copper in drinking water on spatial memory and fear conditioning. *Journal of Geochemical Exploration* 88, 91–94
- [34] SÁNCHEZ D. Validación de Métodos para la Determinación en Aguas Superficiales de Metales alcalinos (sodio y potasio) por absorción atómica a la llama y alcalinotérreos (calcio y magnesio) por volumetría EDTA. Recuperado de internet en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en la página: <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/estudiantes/dlilian/contenido.htm>

[35] MORENO C, GARCIA M. (2008). Nuevas alternativas para la simplificación y mejora de la metodología de análisis de metales pesados en muestras ambientales. Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

[36] Cronin S.J, Neall V.E., Lecointre J.A., Hedley M.J., Loganathan P.(2003) Environmental hazards of Fluoride in volcanic ash: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research 121, 271 – 291.

[37] CARDER. Generalidades Cuenca Del Río Campoalegre. Recuperado en noviembre de 2013 del sitio web de la Corporación Autónoma de Risaralda en el link: <http://www.carder.gov.co/intradocuments/webDownload/generalidades-cuenca-campoalegre>

[38] EMPOCALDAS. Memorias de cálculo: mejoramiento aducción Campoalegre y aducción Los Cuervos en el marco del plan departamental del agua de Caldas municipio de Chinchiná. Recuperado en Octubre de 2013 del sitio web del portal único de contratación en el link: [http://www.contratos.gov.co/archivospuc1/2011/DA/217000001/11-1-72944/DA\\_PROCESO\\_11-1-72944\\_217000001\\_3296307.pdf](http://www.contratos.gov.co/archivospuc1/2011/DA/217000001/11-1-72944/DA_PROCESO_11-1-72944_217000001_3296307.pdf)

[39] CRQ. (2011). Proyecto de reglamentación de las aguas del Río Quindío y sus tributarios. Recuperado en Octubre de 2013 del sitio web de la Corporación Autónoma Regional del Quindío en: <http://www.crq.gov.co/Documentos/DESCARGA%20DE%20DOCUMENTOS/INFORME%20REGLAMENTACION%20RIO%20QUINDIO.pdf>

[40] García, P. L. (2010). Análisis espacial y temporal del índice de escasez de agua en la cuenca del Río Quindío. Investigación Aplicada. Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

[41] Escobar, J. L. (2009). Análisis del tramo del río Otún entre la vidriera Otún y la Estación eléctrica Belmonte no. 2 del municipio de Pereira utilizando los programas hidrosig java y hec-ras. Informe final escrito para la CARDER.

[42] Walton H.F., Reyes J. (2005) Análisis químico e instrumental moderno, editorial reverté. Páginas 405

[43] Skoog D. A; Holler F. J; Nieman T.A. Principios de análisis instrumental, McGraw Hill, Sexta edición. 2008.

[44] Granada N., Escobar D.F.(2012). 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. Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

[45] Crubellati, R., et al. (2009). Aspectos prácticos de la validación e incertidumbre en medidas químicas. Primera edición. Buenos Aires: Ciencia y tecnología para el desarrollo – CYTED.

[46] Eurachem. (2005). Guía de Laboratorio para la Validación de Métodos y Temas Relacionados. Segunda Edición, México: Centro Nacional de Metrología – CENAM.

[47] Ministerio de salud de Costa Rica. Guía de validación de métodos analíticos. Recuperado en noviembre de 2013 del sitio web del Ministerio de salud de Costa Rica en: <http://www.ministeriodesalud.go.cr/empresas/protocolos/guiavalidacionmetodosanaliticos.pdf>

[48] Quino, I., Ramos, O., & Guisbert, E. (2007). Determinación del límite de detección instrumental (LDI) y límite de cuantificación instrumental (LCI) en elementos traza de agua subterránea. Revista Boliviana de Química 24 no. 1.

[49] Ministerios de la Protección social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto 1575 de 2007, Resolución 2115. Artículos 5, 6 y 7.

[50] Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. [http://www.ccme.ca/publications/ceqg\\_rcqe.html](http://www.ccme.ca/publications/ceqg_rcqe.html)

[51] Port of London Authority. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life  
<http://www.pla.co.uk/Environment/Canadian-Sediment-Quality-Guidelines-for-the-Protection-of-Aquatic-Life>

[52] Clesceri, L., Greenberg, A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 3030C. Treatment for Acid-Extractable Metals. 20th edition. USA: American Public Health Association, American Water Work Association. Water Environment Federation.