



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA



CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA



CIRA/UNAN-MANAGUA

Trabajo de Tesis
Para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua

Titulo:

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas;
acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería
artesanal del oro”.

Autora:

Lic. Marcela Isabel Matamoros Ortega

Comité de Tesis:

Tutor: PhD. Francisco Picado Pavón

Asesores: PhD. Thelma Salvatierra

PhD. Ricardo Sánchez

MSc. Pablo Rodríguez

Managua, 14 de mayo de 2020.

Tesis patrocinada por:



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS



DAAD
Deutscher Akademischer Austausch Dienst
German Academic Exchange Service



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN-MANAGUA



CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA



CIRA/UNAN-MANAGUA

Trabajo de Tesis
Para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua

Título:

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas;
acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería
artesanal del oro”.

Autora:

Lic. Marcela Isabel Matamoros Ortega

Comité de Tesis:

Tutor: PhD. Francisco Picado Pavón

Asesores: PhD. Thelma Salvatierra

PhD. Ricardo Sánchez

MSc. Pablo Rodríguez

Managua, 14 de mayo de 2020.

Tesis patrocinada por:



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS



DAAD
Deutscher Akademischer Austausch Dienst
German Academic Exchange Service



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA



CIRA/UNAN-MANAGUA

Maestría Regional Centroamericana en Ciencias
del Agua con énfasis en Calidad del Agua

2020: "Año de la Educación con Calidad y Pertinencia"

REF.: PMRCA / PGV – 34 / 2020

Acta de Defensa de Tesis de Posgrado No. 34

De acuerdo con lo establecido por la Ley No. 89 (Ley de Autonomía de las Instituciones de Educación Superior) y en el Título VII del Reglamento de Educación Continua y Estudios de Posgrado de la UNAN – Managua, la Comisión del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua conformó el Tribunal Examinador para el Acto de Defensa de Tesis de Maestría de la Licenciada Marcela Isabel Matamoros Ortega, estudiante del VI Ciclo con Carnet No. 16-82202-0, con los siguientes miembros:

MSc. Sergio Enrique Salazar Vanegas	Presidente
MSc. Bertha Amalia Fierro Correa	Secretaria
MSc. Mario Alberto Gutiérrez Gutiérrez	Vocal

Con el objetivo de evaluar el acto de defensa de la tesis titulada "Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro"

Siendo las 09h00 horas del día viernes 13 de marzo de 2020, se encuentra reunido el Tribunal Examinador en el Aula de la Maestría del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua), habiendo evaluado el documento de tesis escrito y escuchado la presentación y defensa del tema, y recibidas las respuestas a las preguntas formuladas por los miembros de este tribunal presente, le otorgamos la calificación cualitativa de Aprobado correspondiendo a la calificación cuantitativa de Ochenta y Nueve (89), con lo cual se dan por concluidos los requisitos para que la Licenciada Marcela Isabel Matamoros Ortega obtenga el título de Máster en Ciencias del Agua.

LA libertad por la Universidad!

Hospital Monte España 300 metros al norte, Col. Postal 4098 | Managua, Nicaragua | www.una.unn.edu.ni
Tel: ++ (505) 2278 6981 y 82 ext. 8330 | Correo: sistema.delegados@una.unn.edu.ni, maestría.cimrcasdelaguas@yahoo.com, centrodelagua@una.unn.edu.ni



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN
EN RECURSOS ACUÁTICOS
DE NICARAGUA
CIRA/UNAN-MANAGUA

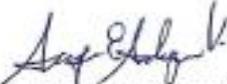


Maestría Regional Centroamericana en Ciencias
del Agua con énfasis en Calidad del Agua

2020: "Año de la Educación con Calidad y Pertinencia"

El Tribunal Examinador asigna las siguientes recomendaciones a ser incorporadas al documento final de tesis (ver documento anexo). Una vez realizadas estas se le concede el Título de **Máster en Ciencias del Agua**.

Leyda que fue la presente acta de defensa de tesis del Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua con énfasis en Calidad del Agua, la encontramos conforme, ratificamos y firmamos en la ciudad de Managua, República de Nicaragua, a los trece días del mes de marzo del año dos mil veinte.


MSc. Sergio Enrique Salazar Vanegas
Presidente


MSc. Betsabé Amalia Fierro Correa
Secretaria


MSc. Mario Alberto Gutiérrez Gutiérrez
Vocal


MSc. Valeria Delgado Quezada
Coordinadora
Programa de Maestría Regional Centroamericana en Ciencias
del Agua con énfasis en Calidad del Agua
CIRA/UNAN-Managua



¡A la libertad por la Universidad!

Hospital Monte España 300 metros al norte, Cód. Postal 4598 | Managua, Nicaragua | www.cira.unan.edu.ni
TEL: ++ (505) 2278 6981 y 82 ext. 8100 | Correo: valeria.delgado@ciaran.unan.edu.ni, maestria@ciaran.unan.edu.ni, ciaran@ciaran.unan.edu.ni

DEDICATORIA.

A la divinidad en cualquiera de sus formas por permitirme vivir y aprender de esta experiencia en todas sus facetas.

A mi madre Aida Beatriz Matamoros, mi abuela Beatriz Aida Ortega y a mi familia, porque en todo momento me motivan con su ejemplo a superarme personal, profesional y espiritualmente.

A Armando José Gómez Palacios, mi querido amigo nicaragüense por su apoyo incondicional, palabras de ánimo y acompañarme en todo este proceso con sus pláticas de vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), por el apoyo brindado, otorgándome la oportunidad de realizar mis estudios de postgrado en Nicaragua. Gracias por la confianza.

Muy especialmente a mi tutor de tesis y amigo, PhD. Francisco Picado investigador del CIRA/UNAN-Managua, porque desde que las ideas eran difusas me orientó con soporte y discusión científica, paciencia y buen sentido del humor.

Al PhD. Ricardo Sánchez Murillo, investigador del laboratorio de Hidrología Química de la UNA, quien me transmitió la pasión por la ciencia, mostrándome que en los detalles está la calidad del trabajo y por transmitir certeramente sus conocimientos.

A la PhD. Thelma Salvatierra, investigadora del CIRA/UNAN-Managua, por su paciencia, fundamento científico y entrega al enseñarme sobre Macroinvertebrados Acuáticos. Gracias por todo su apoyo, consejos y prodigiosa amistad.

A mi asesor Msc. Pablo Rodríguez, por su colaboración con los proyectos que coordina, por el constante apoyo, aportes en esta investigación y la confianza que me ha brindado.

Al Lic. Carlos Thompson director del Centro de Estudios y Control de Contaminantes (CESCCO), la Dra. Aracely Membreño y Ana Carolina Castillo por sus gestiones, colaboración y apoyo con análisis de muestras de agua y sedimento.

Al Instituto Hondureño de Ciencias de la tierra, a la directora de la Escuela de Biología Elia Sarmiento, y al laboratorio de hidrobiología de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH), por el préstamo de equipo, facilitación de materiales y el apoyo brindado.

Al Sr. Alcalde del Corpus, Luis Ruedas y al encargado de la unidad de medio ambiente Darlín Laínez, por su apoyo con vehículo, gasolina, conductor y personal para movilizarme en la zona de estudio.

Al Ing. Rossbel Rodríguez y a la Lic. Samara Martínez, que me ayudaron incansablemente en todo el proceso de tesis. Muchas gracias por su apoyo incondicional.

Y finalmente, al CIRA/UNAN-Managua a través del departamento de docencia y del laboratorio de Hidrobiología, quienes, con sus gestiones, préstamos de equipos y facilitación de las instalaciones colaboraron para culminar esta investigación.

A todos y todas, muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xviii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ÁREA DE ESTUDIO	3
1.2 ANTECEDENTES.....	6
1.3 OBJETIVOS	8
1.3.1 Objetivo General	8
1.3.2 Objetivos Específicos	8
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	11
II. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Fuentes naturales y antropogénicas del mercurio.	13
2.2 Características generales y especiación química del mercurio.....	15
2.3 Mercurio en compartimientos ambientales	16
2.4 Mercurio en la atmósfera.....	17
2.5 Mercurio en el suelo y sedimento	18
2.5.1 Factores fisicoquímicos que influyen la disponibilidad de mercurio en los sedimentos	19
2.5.2 Factores fisicoquímicos que influyen la disponibilidad del mercurio en las aguas	20
2.5.3 Bioacumulación y relación del mercurio con las poblaciones de macroinvertebrados acuáticos	22
2.6 Valores de referencia de variables para agua y sedimento	23
2.6.1 Referencias de calidad de agua para uso de consumo humano	23

2.6.2 Referencias estadounidenses de protección ambiental (USEPA) para la calidad de agua para uso de protección de la vida acuática	24
2.6.3 Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG)	24
2.6.4 Normas CAPRE (Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana).....	24
2.6.5 Valores guías Internacionales en agua y sedimento	25
2.7 Variables fisicoquímicas de campo en agua superficial.....	25
2.8 Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos	27
2.9 Isótopos estables	34
III. METODOLOGÍA.....	37
3.1 Recopilación de información secundaria	37
3.2 Gira de reconocimiento	37
3.2.1 Selección de sitios y estrategia de muestreo	37
3.3 Levantamiento de datos para caracterización de las fuentes y las emisiones de mercurio.....	39
3.4 Preparaciones previas al muestreo	40
3.5 Medición de Caudal	41
3.6 Muestreo de agua superficial	42
3.7 Muestreo de sedimentos	44
3.8 Muestreo cualitativo multihabitat de macroinvertebrados acuáticos (Mia) ...	45
3.9 Muestreo de lluvia y agua superficial para análisis de isótopos estables.....	46
3.10 Análisis de laboratorio	47
3.10.1 Agua superficial	47
3.10.2 Agua de lluvia y agua superficial para análisis de isótopos estables	48

3.10.3 Sedimento.....	49
3.10.4 Macroinvertebrados acuáticos	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
4.1 Fuentes y emisiones de mercurio en la microcuenca del río Calderas	52
4.2 Variables fisicoquímicas en agua superficial	55
4.2.1 Temperatura	55
4.2.2 Oxígeno disuelto.....	56
4.2.3 Potencial de Hidrogeno (pH).....	57
4.2.4 Conductividad eléctrica.....	58
4.2.5 Turbidez	59
4.2.6 Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT)	60
4.2.7 Concentraciones de mercurio en agua superficial	63
4.3 Variables fisicoquímicas en sedimentos.....	67
4.3.1 Temperatura	67
4.3.2 Potencial de Hidrógeno (pH).....	67
4.3.3 Materia orgánica y granulometría.....	68
4.3.4 Concentraciones de mercurio en sedimentos.....	70
4.4 Macroinvertebrados acuáticos (Mia) como Indicadores biológicos de calidad de las aguas superficiales.....	73
4.4.1 Composición Taxonómica y abundancia numérica	73
4.4.2 Índices de diversidad	79
4.4.3 Índice Biótico a nivel de Familias	81
4.5 Relación isotópica entre las lluvias y el agua superficial.....	83
4.5.1 Régimen de precipitación en abril, mayo y junio 2018	83

4.5.2	Trayectorias de masas de aire en relación con la lluvia y variaciones de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{2}\text{H}$ y exceso de deuterio.....	84
4.5.3	Línea meteórica local del agua (LMWL).....	88
4.6	Acciones para promover el manejo adecuado en el uso y control de las emisiones del mercurio	90
4.6.1	Optimización de las rastras mineras actualmente en operación	90
4.6.2	Canal colector de agua y cosecha de agua	91
4.6.3	Sensibilización, capacitación y programas de educación ambiental	91
V.	CONCLUSIONES.....	94
VI.	RECOMENDACIONES	96
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	98
VIII.	ANEXOS	109
Anexo 1.	Variables fisicoquímicas en agua superficial	109
Anexo 2.	Granulometría y variables fisicoquímicas de sedimentos superficiales	111
Anexo 3.	Macroinvertebrados acuáticos	113
Anexo 4.	Datos meteorológicos	115

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Valores guías de concentración de mercurio (Hg) para agua y sedimento	25
Tabla 2. Clasificación de la calidad del agua en función de su puntaje obtenido, IBF-SV, 2010.	32
Tabla 3. Ubicación de sitios seleccionados a muestrear, El Corpus, Choluteca 2018.....	39
Tabla 4. Ubicación geográfica de los pluviómetros para la recolección de agua de lluvia y agua superficial para análisis de isótopos estables. El Corpus, Choluteca 2018.....	46
Tabla 5. Riqueza taxonómica en El Corpus, Choluteca en los meses de abril y mayo 2018.....	75

ÍNDICE DE MAPAS.

Mapa 1. Macro ubicación y micro ubicación de la microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.	4
Mapa 2. Geología, fallas y red hídrica del área de estudio. Datos tomados de Ruiz, 2017.....	5
Mapa 3. Sitios muestreados en la microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.....	38
Mapa 4. Sitios de procesamiento de oro y quema de amalgama, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018 (Información obtenida con la Unidad de Medio Ambiente de la alcaldía de El Corpus).....	52
Mapa 5. Concentraciones de mercurio total en agua (mg/l), recolectada en abril y mayo del 2018 (sitios muestreados: referencia, 1, 2, 4 y 6). Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.	66
Mapa 6. Concentraciones de mercurio total en sedimentos ($\mu\text{g/g}$), recolectados en abril y mayo del 2018 (sitios: referencia, 1 al 7) . Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.	72
Mapa 7. Abundancia numérica de macroinvertebrados acuáticos en abril, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.	77
Mapa 8. Abundancia numérica de macroinvertebrados acuáticos en mayo, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.	78
Mapa 9. Calidad del agua en abril y mayo con base en el IBF-SV, 2010. Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.	82
Mapa 10. a) Lluvia en mm/día en los meses de abril, mayo y junio. b) Concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ y trayectorias de masas de aire en los meses de abril, mayo y junio. c) Concentraciones de exceso de deuterio y trayectorias de masas de aire en los meses de abril, mayo y junio	88

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Gráfico 1. Concentraciones de sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales (mg/l) en las aguas de los ríos San Juan y Calderas. Abril y mayo 2018, microcuenca del río calderas.	62
Gráfico 2. Textura (%) de los sedimentos muestreados en abril 2018. Microcuenca	69
Gráfico 3. Textura (%) de los sedimentos muestreados en mayo 2018. Microcuenca	70
Gráfico 4. Número de taxa y presencia de macroinvertebrados acuáticos. en los ríos San Juan Arriba y Calderas., abril y mayo, 2018. El Corpus Choluteca.	74
Gráfico 5. Índices de diversidad analizados en los macroinvertebrados acuáticos en abril y mayo, microcuenca del río Calderas, El Corpus Choluteca 2018.	80
Gráfico 6. a) Lluvia diaria (mm/día) y acumulada (mm), El Corpus, Choluteca 2018.	83
Gráfico 7. Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en lluvia y agua superficial	86
Gráfico 8. Línea meteórica local de El Corpus, Choluteca en los meses de abril, mayo y junio en El Corpus, Choluteca 2018.	89

ÍNDICE DE FOTOS.

Foto 1. Ciclo del mercurio (Hg). Fuente UNEP, 2013 (citado en Carreño, 2007)...	13
Foto 2. Ciclo del mercurio en una red de drenaje. Reproducido de Selim et al., 2009.....	14
Foto 3. Principales transformaciones entre las especies de Hg en los suelos y sedimentos. Tomado de (Moreno, 2008, P. 20-21).	18
Foto 4. Principales transformaciones de las especies de mercurio en el medio acuático, tomado de (Vázquez, 2008).....	21
Foto 5. Preparación y revisión de equipo en simulación de muestreo. Sitio 3, río San Juan Arriba, 14 abril 2018.....	40
Foto 6. Frascos de plástico listos para ser usados en la colecta de muestras de agua superficial y de lluvia.	40
Foto 7. Medición de ancho del río para mediciones de caudal. Sitio 6, río Calderas. 31 mayo 2018.	41
Foto 8. Medición de variables fisicoquímicas en agua superficial. Sitio 6, río Calderas, 31 mayo 2018.....	42
Foto 9. Toma de muestra de agua superficial para análisis de mercurio y preservación en hielo, sitio 6, río Calderas, 17 abril 2018.	43
Foto 10. Recolecta de muestras de sedimento con draga. Sitio 2, río San Juan Arriba. 16 abril 2018.....	45
Foto 11. Manipulación de red D. Sitio 6, río Calderas. 30 mayo 2018 y recolección de canto rodado. Sitio 7, río Calderas. 31 mayo 2018.....	46
Foto 12. Preparación de la muestra y tamizado para analisis de granulometría. UNI/RUPAP 7 noviembre 2018.	50
Foto 13. Identificación taxonómica de macroinvertebrados acuáticos, Laboratorio de Hidrobiología, CIRA/UNAN-Managua.14 noviembre 2018.	51
Foto 14. a) Rastra minera artesanal. b) Molinete artesanal. c) Fundición de amalgama en comal. El Corpus, Choluteca 2018.	54

ÍNDICE DE ANEXOS.

Anexo 1. Variables fisicoquímicas en agua superficial.	109
Anexo 2. Granulometría y variables fisicoquímicas de sedimentos superficiales.	111
Anexo 3. Macroinvertebrados acuáticos	113
Anexo 4. Datos meteorológicos.	115

ABREVIACIONES.

AAS	Espectroscopía de Absorción Atómica.
CC	Carga de contaminantes.
CCMG	Guías de Calidad Ambiental Canadiense.
CE	Conductividad Eléctrica.
CESCCO	Centro de Estudios y Control de Contaminantes.
CV	Coeficiente de Variación.
DECA	Dirección de evaluación y control ambiental.
Eh	Potencial Redox.
EPA	Environmental Protection Agency.
g/l	Cantidad de gramos por cada litro.
GIRH	Gestión Integrada de Recursos Hídricos.
g	Gramos.
GNIP	Sistema global de asimilación de datos.
Hg-t	Mercurio Total.
IBF	Índice Biótico por Familias.
IBF-SV-2010	Índice Biótico por familias de El Salvador, 2010.
IHCIT	Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra.
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar.
m ³ /s	Cantidad de metros cúbicos por segundo.
MAPE	Minería Artesanal y a Pequeña Escala.
MO	Materia orgánica.
m	Metros.
N	Número total.
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos.
OD	Oxígeno Disuelto.
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
pH	Potencial de Hidrógeno.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Q	Caudal.
Ref.	Referencia.
SMWW	Métodos estándar para examinar agua y aguas residuales.
SDT	Sólidos Disueltos Totales.
SST	Sólidos Suspendidos Totales.
T°	Temperatura.
Ton	Toneladas.
UNAH	Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
μScm	Micro Siemens por centímetro, unidad de conductividad eléctrica.

RESUMEN

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

2020

El mercurio ha sido usado por tradición bicentenaria en la minería artesanal de oro a pequeña escala (MAPE) en el municipio de El Corpus, Cholulteca. Las liberaciones de ese metal tóxico al ambiente (~ 1,0 toneladas/año), han contaminado gradualmente la red hídrica, sedimentos, aire y biota en la microcuenca del río Calderas; por ello esta investigación evaluó la contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas y la calidad del agua a través de indicadores biológicos para proponer acciones en el uso adecuado y el control de las emisiones de mercurio en la microcuenca del río Calderas. Además, valoró la composición isotópica del agua de lluvia y superficial para examinar la respuesta del río a las lluvias.

Reuniones y entrevistas con actores locales y de instituciones de gobierno fueron necesarias para caracterizar las fuentes de emisiones de mercurio. Simultáneamente, muestras ambientales como agua, sedimentos, macroinvertebrados acuáticos, fueron recolectadas y analizadas, acompañadas de mediciones de caudales y variables fisicoquímicas in situ en abril y mayo del 2018.

Los resultados revelaron concentraciones anómalas de mercurio en las aguas (0,02 a 4 928 mg/l) y sedimentos (261,955 µg/g a 2 773,199 µg/g), sobrepasando los valores guías para la protección de la vida acuática. Además, la mala calidad del agua en los ríos estudiados está relacionada con los sitios donde prevalece una actividad minera de mayor intensidad, siendo un factor determinante para la baja riqueza taxonómica de macroinvertebrados acuáticos en los ríos San Juan Arriba y Calderas. El origen de las masas de aire indicó lluvias con comportamiento convectivo en abril y mayo, en el caso de junio un comportamiento estratiforme, debido a ello los isótopos estables mostraron un exceso de deuterio menor, indicando predominio de evaporación secundaria y poca infiltración en este mes.

Los resultados revelan una alta contaminación por mercurio y permitieron la identificación de una disposición inadecuada y la inexistencia de manejo apropiado de los residuos mineros, lo cual conlleva a proponer acciones para controlar y disminuir el uso de mercurio en la zona de estudio.

Palabras claves: minería, mercurio, macroinvertebrados acuáticos, isótopos estables.

I. INTRODUCCIÓN

La minería artesanal a pequeña escala (MAPE) históricamente ha utilizado y sigue utilizando el mercurio para extraer el oro. Alrededor del planeta, esta actividad contribuye un poco más del 30% con las emisiones ambientales globales de mercurio a través de la quema de la amalgama (Hinton, 2003).

Dos métodos que involucran el uso del mercurio son empleados en el municipio de El Corpus: el primero es moliendo la broza (material extraído desde los yacimientos) en molinos tradicionales hasta reducirla a pequeñas partículas y de ahí extraer el mineral, y el segundo es utilizando el peso específico de la broza molida y separándola por medio de una batea en los cauces de los ríos (Dirección Ejecutiva de Fomento a la Minería [DEFOMIN], 2012).

Las rastras mineras en operación (mapa 4) contribuyen a que la contaminación por mercurio se distribuya a lo largo de la cuenca encausándose a través de las aguas superficiales y acumulándose en los sedimentos, ya que las rastras en su mayoría están localizadas en la parte alta del río San Juan Arriba, desembocando a la parte media del río Calderas.

Los ríos reciben los desechos mineros que contienen mercurio y otros metales cuya toxicidad representa un impacto negativo a la calidad de estos ecosistemas y a la salud humana. Este impacto es reflejado en la pérdida de la calidad natural de los ríos producto de la contaminación y la presencia de colas mineras en el lecho y zona riparia de los ríos San Juan Arriba y Calderas.

La extracción del oro usando mercurio es uno de los procesos que históricamente ha producido más impactos al ambiente. En consecuencia,

en el año 2016 la MAPE en el municipio de El Corpus liberó al ambiente aproximadamente 0,7 toneladas de mercurio y unas 10,0 toneladas en la década reciente. Simultáneamente, son liberadas 46 430,0 toneladas de material sólido (arenilla) al año como desechos del proceso de extracción (Germer & Cálix, 2017). Los desechos mineros son un material alóctono que contamina con mercurio los sedimentos y las aguas superficiales, azolva los ríos destruyendo la biota acuática y disminuyendo la disponibilidad de agua con buena calidad para la población de la cuenca baja.

En ese contexto, esta investigación científica responde a las preocupaciones nacionales y locales al evaluar la contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas. Esta es la primera investigación que analizará e interpretará la información generada sobre la presencia del mercurio en el agua y sedimentos, su relación con los macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos y el conocimiento del origen de las masas de aire donde se originan las lluvias aunado con el uso de técnicas isotópicas.

La MAPE en el municipio de El Corpus se realiza sin controles ambientales ni sociales, por tanto, es imperativo a corto plazo reducir y posteriormente eliminar el uso de mercurio. Los resultados de esta investigación permitirán proponer acciones que controlen el manejo, el uso y la liberación ambiental del mercurio, abordando la problemática a través de la examinación de las concentraciones de mercurio en aguas superficiales y sedimentos. Además, permitirá desarrollar acciones integrales y planear estrategias de políticas públicas para una adecuada gestión del agua, sirviendo esta investigación de base para la toma de decisiones en el municipio de El Corpus, pudiendo ser replicado en otras áreas donde es practicada la MAPE en el país.

1.1 ÁREA DE ESTUDIO

La extensión geográfica de Honduras es de 112 492 km² y se sub divide en 18 departamentos. En la zona sur se encuentra el departamento de Choluteca con un área de 4 397 km² (mapa 1), el cual es importante por su actividad económica siendo principalmente la agricultura, turismo y la minería la cual se concentra en el municipio de El Corpus.

El área de estudio comprendió la microcuenca del río Calderas con un área de 47,75 km² y un perímetro de 44,28 km, la cual forma parte de la cuenca del río Sampile que drena hacia el Golfo de Fonseca (mapa 1). El Cerro Guanacaure se ubica en el municipio de El Corpus, y actualmente está catalogado como un Área de Usos Múltiples dentro del sistema de áreas protegidas de Honduras mediante decreto No.5- 99-E (Instituto de Conservación Forestal [ICF], 2015).

El río principal del área de estudio posee una longitud de 13,1 km, nace en la parte alta del cerro San Judas y recorre la falda del cerro Calaire, con una pendiente promedio de 33,37%. Por sus características fisicométricas, la microcuenca se considera pequeña con una densidad de drenaje baja de 1,39 km/km² “indicando presencia de suelos relativamente impermeables” (IBAL, 2009, p. 149). La microcuenca posee un índice de Gravelius de 1,99 indicando que posee una forma rectangular a oblonga. Dichos parámetros reflejan que “las descargas son de menor volumen debido a que el cauce de agua principal es más largo que los cauces secundarios y los tiempos de concentración para eventos de precipitación son distintos” (Machado, 1979, p.10).

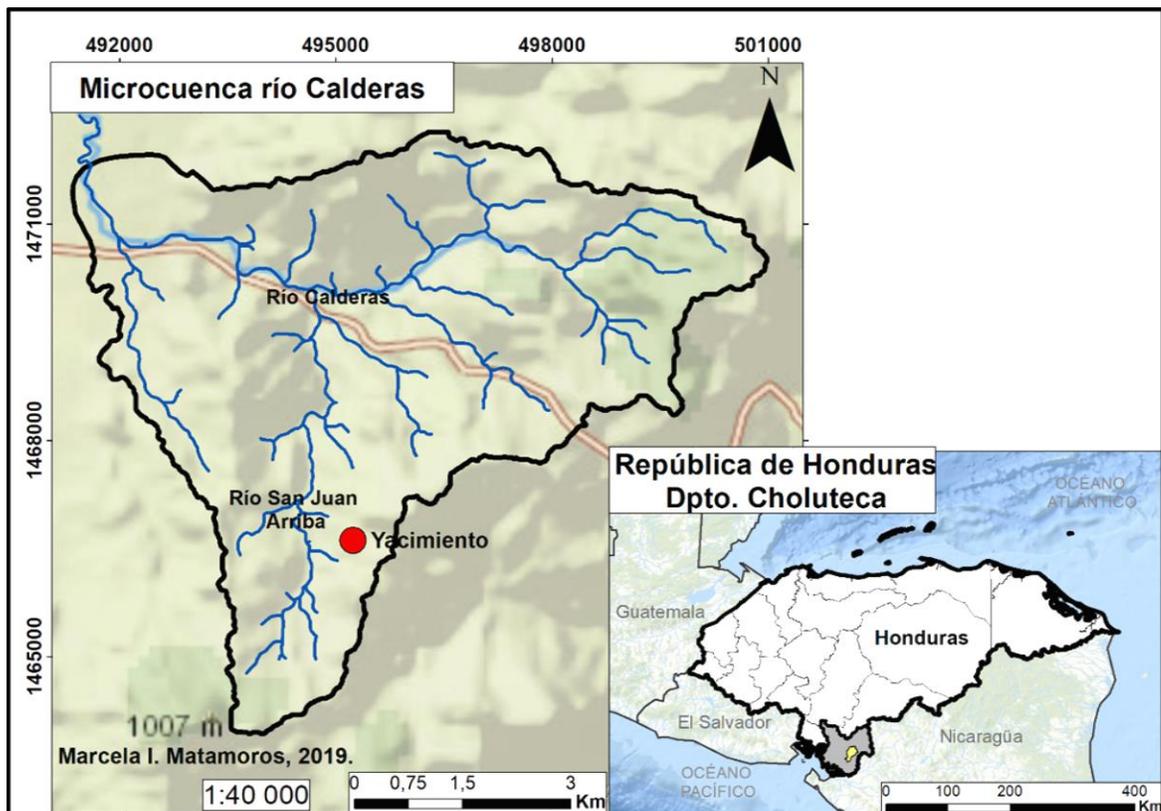
De acuerdo a la geología, las brechas e ignimbritas predominan principalmente en cuenca alta, los depósitos aluviales en la cuenca baja y en la cuenca media las brechas silicificadas (mapa 2). Respecto a su hidrogeología, predomina el acuífero fracturado y en segundo lugar el acuífero libre. Las fracturas son una de las principales vías de ingreso de agua al acuífero, el movimiento de las

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

aguas subterráneas es controlado parcialmente por los sistemas de fallas, principalmente en el acuífero fracturado (Ruiz, 2017).

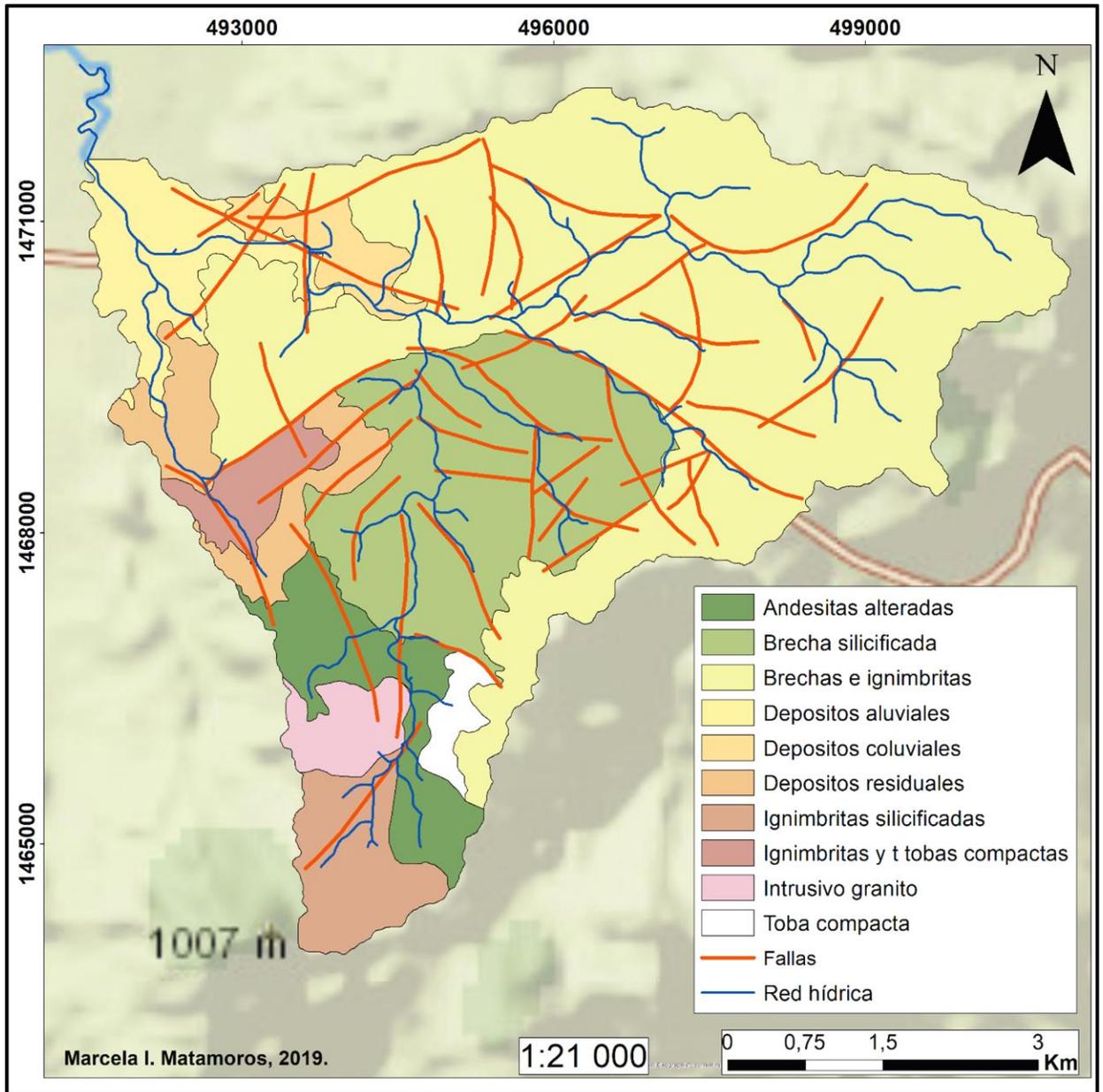
Debido a su ubicación geográfica, el clima en esta zona presenta características tropicales con dos estaciones bien marcadas, una seca de noviembre a abril y otra lluviosa de mayo a octubre. En los meses de julio y agosto se presenta el veranillo o canícula. La precipitación se ve influenciada por el flujo contante de humedad proveniente del océano pacífico y en un menor porcentaje por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La precipitación media anual sobre el área de la cuenca del río Sampile oscila entre 1 459 a 3 773 mm (IHCIT, 2017).

La minería artesanal a pequeña escala en el municipio de El Corpus, es la más antigua de Honduras siendo la principal fuente de empleo y de contaminación por metales tóxicos en la zona.



Mapa 1. Macro ubicación y micro ubicación de la microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.



Mapa 2. Geología, fallas y red hídrica del área de estudio (Microcuenca del río Calderas).
Datos tomados de Ruiz, 2017.

1.2 ANTECEDENTES

La actividad minera en el municipio de El Corpus, ha existido desde tiempos coloniales. Las explotaciones mineras de oro comenzaron en 1585 y eran realizadas por inmigrantes europeos atraídos por la riqueza de la zona. Desde esta fecha hasta la actualidad, la explotación minera ha sido un rubro de importancia para la economía familiar del municipio ([Instituto Hondureño de Geología y Minas INHGEOMIN], 2015).

Hasta el Siglo XVII, solamente existían dos métodos de extracción de oro en Honduras: a) El oro entre arenas, como el encontrado en el municipio de El Corpus, Choluteca de un excelente color amarillo y b) el uso de sales mercuriales o azogue, para la extracción de oro, mediante un método de amalgamación que permitía purificar el oro, al ser la amalgama sometida a altas temperaturas. Para ese siglo, el control y suministro de Azogue, estaba bajo el mando de la corona, creando un monopolio real y una dependencia totalmente conflictiva para los mineros (DeOyuela, 2003).

La minería en el municipio de El Corpus ha involucrado el uso de mercurio para la extracción del oro, lo que consecuentemente ha resultado en la contaminación ambiental y en la exposición humana debido a la liberación de este metal tóxico. En el año 2012, la Dirección Ejecutiva del Fomento a la Minería (DEFOMIN) describió el proceso de extracción de oro en una fracción de la microcuenca del río Calderas (DEFOMIN, 2012) específicamente en el río San Juan arriba, y reveló que por cada 61 sacos de broza procesados diariamente son utilizados 0,28 kg de mercurio metálico para extraer el oro y como resultado de esta práctica fueron encontradas concentraciones de mercurio total entre $<0,0005$ y $0,108$ mg/l y entre $0,0017$ y $0,097$ mg/kg respectivamente en agua y sedimentos en el río San Juan Arriba.

En el 2013 fue desarrollado un informe (Domingo y Giorgio, 2013). sobre minería en los departamentos de Choluteca y Valle por las brigadas

internacionales de paz (PBI). El caso de la minería artesanal del Corpus, dicho informe pone de manifiesto que el agua del cerro El Sabroso, que es la parte alta del río Calderas, está altamente contaminada, con casos de ganado muerto por beber de ella y ha desaparecido la vida acuática de anfibios y peces.

En el 2017, siempre en el municipio de El Corpus, fue realizado un levantamiento de línea base de mercurio (Germer y Cáliz, 2017). En este esfuerzo se realizó un balance de masa oro-mercurio, el cual determinó que cada rastra minera produce diariamente 14,88 g de oro, con una pérdida de 5,0 gramos de mercurio por cada gramo de oro producido. Por lo que, el 70% del mercurio perdido es vertido al suelo a través de las colas mineras de las rastras en el río San Juan Arriba y río Calderas, el restante 30% es liberado a la atmósfera a través de la quema de la amalgama.

En diciembre del 2017, el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT), apoyados por el Programa de Gobernanza Hídrica Territorial Región 13 Golfo de Fonseca, realizó un levantamiento y evaluación del catastro del recurso hídrico en microcuencas del río Sampile. En este estudio, determinaron la calidad del agua con indicadores biológicos usando el índice modificado para Costa Rica (BMWP´-CR) en un muestreo puntual en la temporada lluviosa. Los resultados del estudio revelaron que en la parte alta del río San Juan Arriba prevaleció una calidad de agua regular, en la parte media siempre del mismo río una calidad mala, con agua contaminada y en el caso de la parte alta del río Calderas, reportaron una calidad mala, muy contaminada (IHCIT, 2017).

Desde el 2017 no se han realizados nuevos estudios sobre el problema de contaminación ambiental asociado a la minería en El Corpus.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas generada por la actividad minera artesanal de oro, para proponer acciones sostenibles en el uso y el control de las emisiones ambientales de mercurio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las fuentes y emisiones de mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas.
- Examinar el grado de contaminación por mercurio de las aguas y sedimentos en el río San Juan Arriba y Calderas y la relación ecológica con macroinvertebrados acuáticos.
- Determinar la relación de la lluvia y el agua superficial a través de técnicas isotópicas.
- Proponer acciones que contribuyan a disminuir el uso del mercurio, promoviendo el manejo adecuado y su monitoreo ambiental en la microcuenca del río Calderas.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se estima que la minería artesanal de oro y en pequeña escala, produce entre el 20 y el 30 % del oro del mundo lo que representa entre 500 y 800 toneladas anuales (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2008). Esta actividad es realizada por 13 millones de personas (30 % mujeres y 15 % niños) y son 100 millones alrededor del mundo las personas que subsisten directamente de esta actividad (Cano, 2012).

La actividad minera artesanal a pequeña escala (MAPE) en El Corpus, es la más antigua de Honduras y actualmente es realizada por alrededor de 2 500 mineros locales, lo que equivale al 10% de la población del municipio. En esta actividad, el mercurio metálico se usa para separar y extraer el oro de los minerales presentes en las rocas que han sido previamente reducidas a partículas finas durante el proceso de trituración llamado molienda. En la molienda, el mercurio agregado al proceso se adhiere al oro formando una amalgama que facilita su separación de la roca. Para obtener la amalgama, los mineros usan trapos, para retener el producto de la molienda, que luego retuercen. Posteriormente, el mercurio es separado del oro por calentamiento, y liberado a la atmósfera.

La mayoría de las rastras mineras de El Corpus se ubican en la cuenca alta y media del río San Juan Arriba, debido a la cercanía al yacimiento minero. También se ubican en las casas de habitación y cercanías a las fuentes de agua. La actividad de recuperación de oro se lleva a cabo 5 días a la semana. Estas prácticas, no controladas ni normadas, contaminan a las aguas, sedimentos, aire y biota, afectando paulatinamente las aguas de cuencas vecinas.

En el 2017 la MAPE en el Corpus liberó 659 kg de mercurio directamente al ambiente, de los cuales 461 kg encontraron su destino en los suelos y ríos y 198 kg encontraron su ruta en la atmósfera (Germer y Cáliz, 2017).

Dada la toxicidad del mercurio, la contaminación en el área de estudio ha producido la pérdida de la calidad natural de los cuerpos de agua superficiales, creando vulnerabilidad de las fuentes de agua, ya que hay una dispersión de la contaminación al agua, sedimentos, suelos y la atmósfera, generando afectaciones a la biota, los mineros y sus familias por la exposición al mercurio.

La exposición al mercurio produce graves efectos a la salud humana, por ejemplo, Galvão y Corey (1987) expresan que la intoxicación por mercurio produce “nefritis crónica, insuficiencia renal aguda, síndrome neurológico central, daño cerebral fetal y mercurialismo” (p 15). En ese sentido, Lenntech, (2019) menciona otras afectaciones a salud, siendo estas: daño al ADN y cromosomas, reacciones alérgicas, irritación de la piel, efectos negativos en la reproducción, daño en el esperma, defectos de nacimientos y abortos. Los daños a las funciones del cerebro pueden causar la degradación de la habilidad para aprender, cambios en la personalidad, temblores, cambios en la visión, sordera, incoordinación de músculos y pérdida de la memoria.

Evaluar la contaminación por mercurio en El Corpus es de suma necesidad, ya que existe falta de conocimiento por parte de los mineros sobre el manejo de los desechos mineros, el daño ambiental y de salud que implica la exposición y liberación ambiental del mercurio. También ciertos mineros poseen una actitud negativa hacia el cambio o aceptación de nuevas alternativas para la recuperación del oro, debido a su tradición bicentenaria de extracción.

Debido a la problemática descrita anteriormente, esta investigación permitirá proponer a los mineros acciones para el control y manejo del mercurio en la MAPE, capacitar y crear conciencia en las personas expuestas al mercurio, permitir a las autoridades locales tomar decisiones con base en datos científicos para fortalecer las acciones que contribuyan a una buena gestión ambiental.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El cerro Guanacaure donde se ubica el Municipio de El Corpus, es de vital importancia por ser una zona productora de agua y provee de este recurso a algunas comunidades aledañas (ICF, 2015). Sin embargo, a pesar de la importancia hídrica de la zona, la actividad minera en el municipio de El Corpus se ha intensificado en esta área protegida, dando lugar a accidentes de deslaves, alteración de los suelos y contaminación ambiental.

En el año 2014, se suscitó una tragedia, en las bocaminas del cerro La Cuculmecha, la que motivó al Gobierno emitir el decreto ejecutivo PCM 036-2014, el cual declara Zona de Reserva Minera. En este municipio, un total de 1 684 hectáreas, fueron declaradas exclusivamente para la exploración, explotación, transformación y comercialización de minerales mediante la operación de un Parque Minero Industrial que será constituido mediante una Alianza Público-Privada y Comunitaria (Poder Ejecutivo, 2014).

Un 34% de las personas que extraen oro están expuestas directamente al mercurio (DEFOMIN, 2012). Germer y Cáliz (2017) afirman que en El Corpus “se utilizan en promedio, 0,45 kg de mercurio por cada 100 sacos de broza procesada” (p 115). De esta cantidad de mercurio, gran parte se dispone en las llamadas colas de molienda, generando la contaminación de las aguas, sedimentos, y biota, pues no se cuenta con un manejo adecuado de estos desechos ni un sitio adecuado para la disposición final de los mismos.

La suscripción del Convenio de Minamata por la Cancillería Hondureña en el 2014, condujo a su revisión por el Congreso, y a su aprobación en el 2016 y fue, publicado en enero 2017 y entro en vigencia a nivel nacional agosto del mismo año. En preparación para la implementación del Convenio Honduras, actualmente se están desarrollando dos Proyectos: Proyecto Gestión Ambientalmente Racional (GAR) de mercurio y Proyecto MIA NAP, los cuales

contemplan la evaluación inicial del convenio de Minamata PNUMA/Mi ambiente, trabajando como zona piloto el municipio de El Corpus.

En el caso del proyecto de Gestión Ambientalmente Racional (GAR) de mercurio, tiene como objetivo proteger la salud humana y el ambiente de las emisiones y liberaciones de mercurio que se originan del uso intencional del mercurio en minería artesanal y a pequeña escala de oro. Dentro de los alcances del proyecto se contempla mejorar la capacidad a nivel institucional para evaluar y monitorear liberaciones de mercurio, así como el fortalecimiento de las capacidades nacionales para la GAR del mercurio obteniendo como parte de los resultados cifras e información científica a fin de tomar acciones de asuntos prioritarios.

En el contexto de esas iniciativas surge esta investigación que a través de las autoridades de la alcaldía de El Corpus tendrán conocimiento sobre la localización y los niveles de la contaminación por mercurio de las aguas superficiales y sedimentos, así como la interacción entre la lluvia y el agua superficial y la calidad del agua según indicadores biológicos para, posteriormente divulgar los resultados ante la comunidad minera y entes gubernamentales relacionados y proponer acciones a favor del control de la contaminación por mercurio.

Actualmente en la zona no se cuenta con planes de manejo de desechos mineros, ni programas de educación ambiental para la comunidad, por lo que el presente estudio contribuirá como soporte para elaborar posteriormente instrumentos como manuales, guías de mejores prácticas ambientales, plan de gestión integral de los recursos hídricos y así tomar decisiones para el manejo y control de los sitios potencialmente contaminados con mercurio. Esta investigación representa una oportunidad para ser extrapolada a otras áreas mineras del país.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Fuentes naturales y antropogénicas del mercurio.

El mercurio es liberado naturalmente al sistema atmósfera-océano-tierra en su estado elemental gaseoso a través de la actividad geológica, incluidos los volcanes (foto 1). El mercurio está bien mezclado en la atmósfera y, por lo tanto, puede ser transportado a una escala global, teniendo una permanencia en la atmósfera de 0,5 a 1 año (Driscoll et al., 2013). Una vez en la atmósfera, es depositado sobre los ecosistemas oceánicos y terrestres, sin embargo, este vuelve a volatilizarse hacia a la atmósfera (Obrist et al., 2018). El mercurio es un metal tóxico que no tiene ninguna función conocida en la bioquímica o fisiología y no ocurre naturalmente en organismos vivos (Pott & Håkansson, 1999).

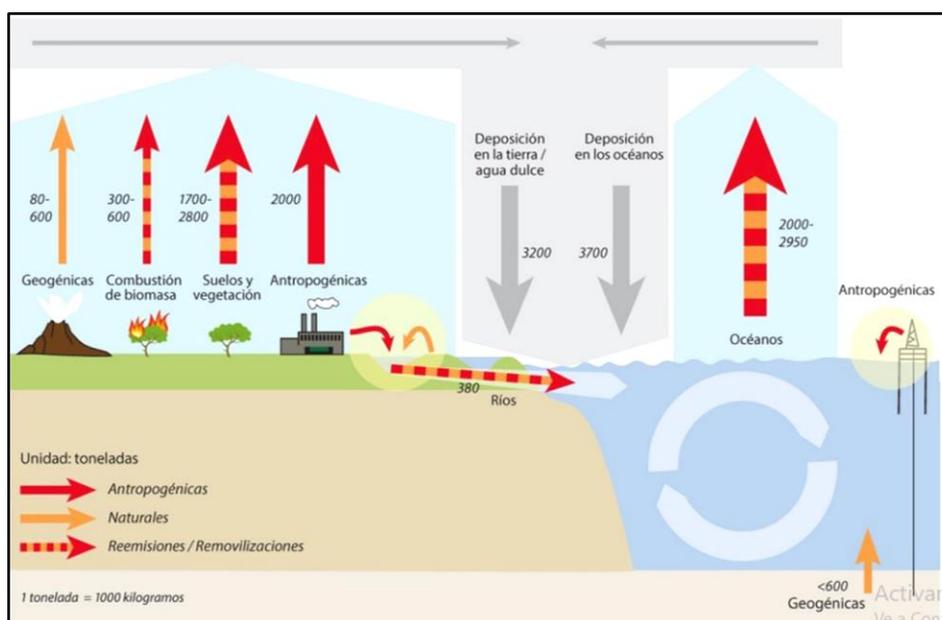


Foto 1. Ciclo del mercurio (Hg). Fuente UNEP, 2013 (citado en Carreño, 2007).

El ciclo biogeoquímico del mercurio se ha visto alterado debido al uso intencional, quema de combustibles fósiles y actividades mineras artesanales (Corbitt et al., 2011). Esas acciones alteran el almacenamiento a largo plazo del mercurio el cual es contenido en sedimentos y minerales, siendo liberados para

movilizarse en la atmósfera. Poch (2003), expresa que el aumento en la concentración de diferentes metales, se debe principalmente a actividades antropogénicas, dando lugar a grandes efectos tóxicos para los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

En los ecosistemas de agua dulce, el mercurio se deposita a través de la escorrentía desde las cuencas hidrográficas y descargas directas causadas por actividades antropogénicas. Generalmente, predomina el (Hg^{2+}), el cual puede ser reducido a $\text{Hg}(0)$, y convertirse en su forma más tóxica como metilmercurio (MeHg) en ambientes anóxicos, donde bacterias sulfato-reductoras y las reductoras de hierro son las responsables de dicha transformación (foto 2) (Gilmour et al., 2013).

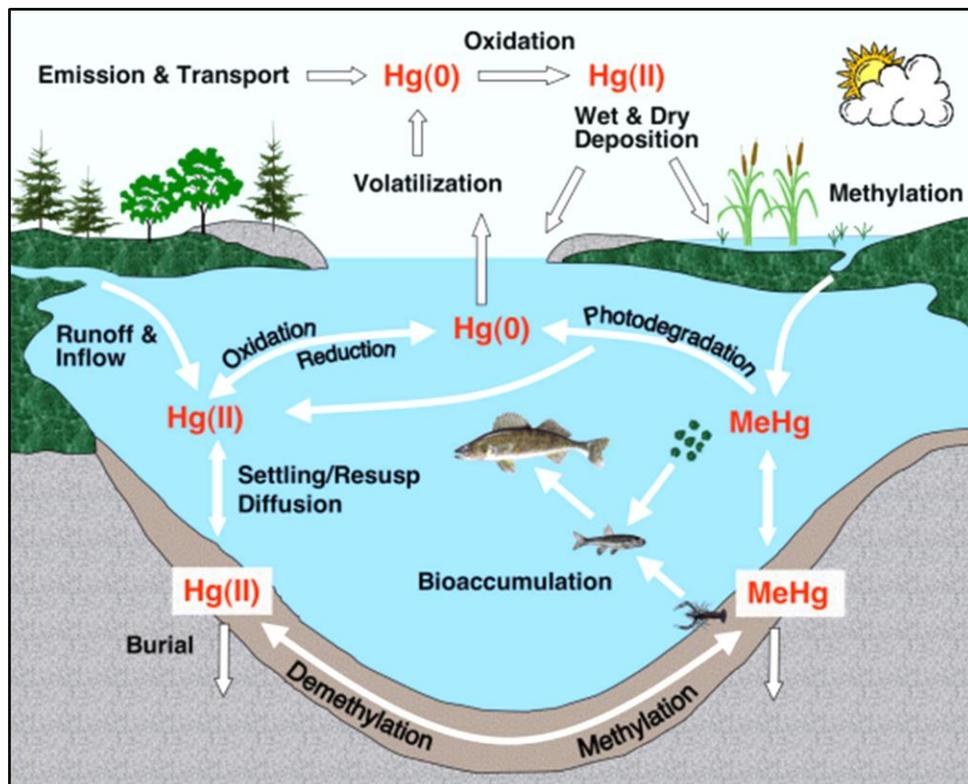


Foto 2. Ciclo del mercurio en una red de drenaje. Reproducido de Selim et al., 2009.

2.2 Características generales y especiación química del mercurio

El mercurio es un elemento metálico de color plateado y es el único metal que permanece en estado líquido a presión y temperatura ambiente, es considerado como uno de los elementos de transición del sistema periódico, su número atómico es de 80, con peso atómico de 200,59 u.m.a, punto de ebullición de 356,58 °C y un punto de fusión de -38,87 °C, siendo el más alto de todos los metales. Es ligeramente volátil a temperatura ambiente, soluble en soluciones oxidantes y en la naturaleza se encuentra en una abundancia de 0,5 ppm (Yarto, Gavillan y Castro, 2004; Moreno, 2008).

El mercurio es un elemento ubicuo, de manera que cualquier producto, ya sea natural o artificial, contendrá al menos trazas de mercurio. Esto es debido tanto a su capacidad de amalgamación con otros metales como al resto de propiedades físico-químicas entre las que destacan su bajo calor específico ($138 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), su baja resistividad a la corriente eléctrica ($95,76 \mu \text{ ohm cm}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$), su alta conductividad térmica ($8,34 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), su alta tensión superficial ($480,3 \text{ din cm}^{-3}$) y su alta presión de vapor ($0,16 \text{ Pa}$), entre otras (Moreno, 2008, p. 16).

Las especies principales de mercurio en el medio ambiente son el mercurio elemental (Hg^0), el mercurio inorgánico y/o ión mercúrico (Hg^{2+}), el ión mercurioso (Hg_2^{2+}), el metilmercurio (CH_3Hg^+) y el dimetilmercurio ($(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$), estas poseen propiedades muy diferentes de volatilidad y de solubilidad en agua y lípidos, lo cual determina su distinta presencia en cada uno de los compartimentos del medio ambiente, así como en su toxicidad (Moreno, 2008, p. 17).

En el agua, el Hg^0 sutilmente se diluye (siglas en inglés DGM - mercurio gaseoso disuelto), y fácilmente es re-emitido a la atmósfera (elevada presión de vapor del Hg). En cambio, la forma del Hg^{+2} es altamente soluble y reactivo en la atmósfera (siglas en inglés RGM- mercurio gaseoso reactivo), está unido a otras partículas (aerosoles) y puede representar de 5% (medios naturales)

hasta 50% (cerca de industrias) del total de Hg disponible en la atmósfera (Schroeder y Munthe 1998). Por otro lado, es la forma dominante que puede formar varios ligandos inorgánicos y orgánicos. (O`Driscoll, 2005, Zhang 2006 como se citó en Molina et al., 2010.).

Entre los inorgánicos sobresaltan S^{2-} , SO_2^{-} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , HCO_3^{-} , CO_3^{2-} , OH^{-} , PO_4^{2-} y entre ligandos orgánicos están ácidos de bajo peso molecular (ión metil, ión etil, ion fenil, oxaloacetato, citrato, etc.) y de elevado peso molecular, como las sustancias húmicas (ácido fúlvico y ácido húmico) (Meech et al., 1998 como se citó en Molina et al., 2010).

A su vez, el mercurio forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales, como: plata (Ag), platino (Pt), uranio (U), cobre (Cu), plomo (Pb), y oro (Au) usado en minería artesanal. En sus compuestos, se encuentra comúnmente como sulfuro de mercurio (HgS). En los estados de oxidación II^{+} , I^{+} forma sales de mercurio (II) y (III), por ejemplo, perclorato de mercurio $Hg(HClO_4)_2$ o nitrato de mercurio $Hg(NO_3)_2$ que son muy solubles en agua y por lo general están disociadas. Las soluciones acuosas de estas sales reaccionan como ácidos fuertes a causa de la hidrólisis (Lenntech, 2019).

2.3 Mercurio en compartimientos ambientales

Las especies de mercurio una vez depositadas están sujetas a un amplio espectro de reacciones químicas y biológicas. Las condiciones de pH, temperatura, contenidos de sales y componentes orgánicos presentes en los compartimientos ambientales favorecen la formación de complejos inorgánicos y orgánicos con el ion mercúrico (Hg^{2+}). Este comportamiento complejante controla en gran medida la movilidad del mercurio. Los complejos inorgánicos son bastante solubles en agua y, por tanto, de gran movilidad; sin embargo, muchos de ellos también tienden a formar nuevos complejos con la materia orgánica (ácidos fúlvicos y húmicos) y coloides minerales del suelo. Por este motivo, el mercurio tiene un largo tiempo de residencia en suelos y sedimento y, debido a esto, el mercurio acumulado en estas matrices, se sigue liberando a

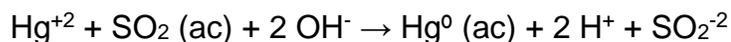
las aguas superficiales y a otros compartimientos ambientales durante largos períodos de tiempo (Moreno, 2008).

La liberación del mercurio desde fuentes naturales, ha permanecido en el mismo nivel a través de los años. Sin embargo, sus concentraciones en el medioambiente están incrementando debido a la actividad humana, siendo la minería aurífera la causa principal de contaminación ambiental por este metal, ya que es liberado directamente a los ríos, suelos y sedimentos (Niane, et al., 2014).

2.4 Mercurio en la atmósfera

El mercurio procedente de fuentes naturales y artificiales constituye un riesgo importante para los organismos vivos. El 98-99% del mercurio atmosférico se produce en fase de vapor el cual se encuentra en la forma de mercurio elemental (Hg^0) y el resto como Hg^{+2} (Vázquez, 2008).

La forma inorgánica del mercurio Hg^{+2} tiene un tiempo de residencia de algunas horas a varios meses, esta forma Hg^{+2} se deposita en nuestro ecosistema en la forma de Hg^0 arrastrado por el agua de lluvia sufriendo varias transformaciones (Vázquez, 2008).



El mercurio elemental Hg^0 es movilizado por las corrientes de aire provocadas por cambios de altas y bajas temperaturas, teniendo alta presión de vapor y siendo parcialmente soluble en el agua. La forma divalente del mercurio Hg^{+2} es la principal forma presente en las aguas naturales encontrándose asociado a gran variedad de ligandos orgánicos e inorgánicos (Vázquez, 2008).

Lindquist, Rhole y Fitzgerald (1985) como se citó en (Vázquez, 2008). asumieron que estas dos formas de mercurio (Hg^{+2} , Hg^0 eran las más

representativas, las cuales estaban integradas en los ciclos geoquímicos del mercurio entre la atmósfera y los océanos.

2.5 Mercurio en el suelo y sedimento

El mercurio en el suelo se encuentra precipitado como hidróxido $\text{Hg}(\text{OH})_2$. No obstante, en medios no muy oxidantes el Hg^{+2} puede reducirse por acción de la luz a ión Hg_2^{2+} y luego a Hg^0 , el cual es muy volátil y puede difundirse por los poros del suelo.

Otra posibilidad que da lugar a la movilización del mercurio es a través de su metilación (foto 3) que se produce por distintos mecanismos microbianos, resultando en la formación de un compuesto organometálico denominado metilmercurio (CH_3Hg^+), el cual es liposoluble. Este compuesto presenta una elevada toxicidad, puesto que pueden atravesar con facilidad las membranas biológicas en particular la piel y a partir de aquí, la incorporación del metal en la cadena trófica está asegurada (Vázquez, 2008).

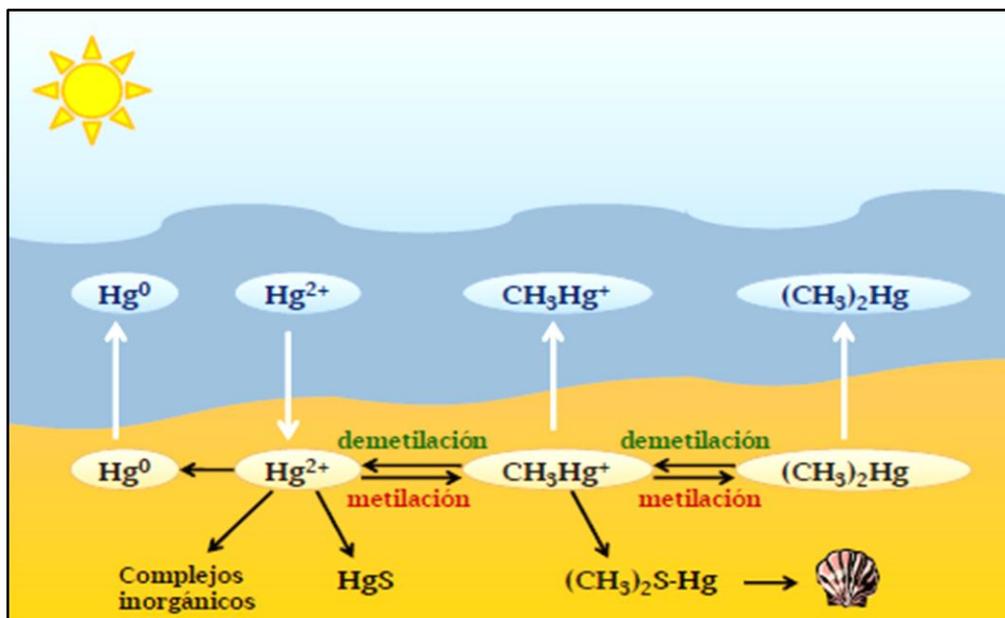


Foto 3. Principales transformaciones entre las especies de Hg en los suelos y sedimentos. Tomado de (Moreno, 2008).

2.5.1 Factores fisicoquímicos que influyen la disponibilidad de mercurio en los sedimentos

Donde hay mayor absorción de metales es donde prevalecen óxidos de hierro y aluminio, materia orgánica, y arcillas (Nriagu, 1980 como se cita en Newman & McIntosh, 1991). Los reductores de mercurio en el suelo pueden ser especies como el Fe^{2+} , compuestos húmicos y fúlvicos. Además, los procesos de reducción pueden verse incrementados por condiciones como la temperatura, la exposición a la radiación solar y el incremento de la humedad en el suelo (Obrist et al., 2018).

La cantidad de oxígeno condiciona el estado de óxido-reducción en los sedimentos. Villa (2003) menciona que la cantidad de oxígeno se ve disminuida hasta en un 50% siendo modificada por las reacciones de respiración y fotosíntesis, esto debido al incremento de la temperatura durante el verano en ecosistemas templados.

Los contaminantes trazas introducidos en el río pueden asociarse rápidamente con partículas y, según el régimen de flujo, se acumulan en áreas de deposición o meandros. En condiciones de caudales bajos, las concentraciones de contaminantes pueden presumiblemente alcanzar el punto donde la fauna bentónica expuesta se ve amenazada. Cuando llega la temporada lluviosa, la escorrentía puede arrojar los contaminantes asociados a los sedimentos río abajo llevándolos a hasta la desembocadura del río, y reduciendo temporalmente las concentraciones en las áreas erosionadas, mientras eventualmente se vuelven a depositar contaminantes (Rolin, 1988).

Algunos compuestos inorgánicos de Hg^{+2} son bastante solubles (y en consecuencia, móviles), suelen formar complejos con la materia orgánica y arcillas de los suelos, este comportamiento limita en gran medida la movilidad del mercurio en los suelos, haciendo que estos actúen como grandes reservas de mercurio antropogénico. Esta relación entre el mercurio y la materia orgánica, marca en gran medida la solubilidad y por tanto la movilidad del Hg en

función de la mayor o menor presencia de ácidos húmicos disueltos, que depende entre otras variables del pH o la posibilidad de formación de fases coloidales (Newman & McIntosh, 1991).

2.5.2 Factores fisicoquímicos que influyen la disponibilidad del mercurio en las aguas

En los ecosistemas acuáticos, el mercurio se deposita a través de la escorrentía a las cuencas hidrográficas, así como también a través de descargas directas causadas por contaminación antropogénica (Gilmour et al., 2013). Los compuestos de mercurio suelen permanecer en la fase acuosa como moléculas no disociadas, dando lugar a valores bajos de solubilidad.

El mercurio en las aguas naturales se puede encontrar en diversas formas fisicoquímicas como metal, ión metálico y como ión organometálico, todas estas formas químicas asociadas al material particulado y al material en solución que actúan como sustratos del mercurio. Las características específicas de cada especie, así como las interacciones de las mismas con lo que las rodea, determina el transporte, las transformaciones químicas, así como los posibles mecanismos de eliminación, sedimentación, volatilización del mercurio en el sistema acuático (Vázquez, 2008).

En las zonas anóxicas del reservorio y bajo la presencia de iones S^{2-} , se forman complejos con el ión Hg^{+2} , e incluso puede llegar a precipitar como HgS . Otras bacterias, son capaces de transformar el mercurio iónico a metil ($HgCH_3^+$) y dimetilmercurio ($Hg(CH_3)_2$), respectivamente, tanto en la zona óxica como en la anóxica. Este fenómeno procura otra vía de escape del mercurio hacia la atmósfera, pues el dimetilmercurio es muy volátil. El ión $HgCH_3^+$ no forma complejos y permanece estable tal cual, en el medio acuoso, siendo transferido fácilmente a los organismos vivos y acumulándose en los animales superiores a través de la cadena trófica (foto 4) (Vázquez, 2008).

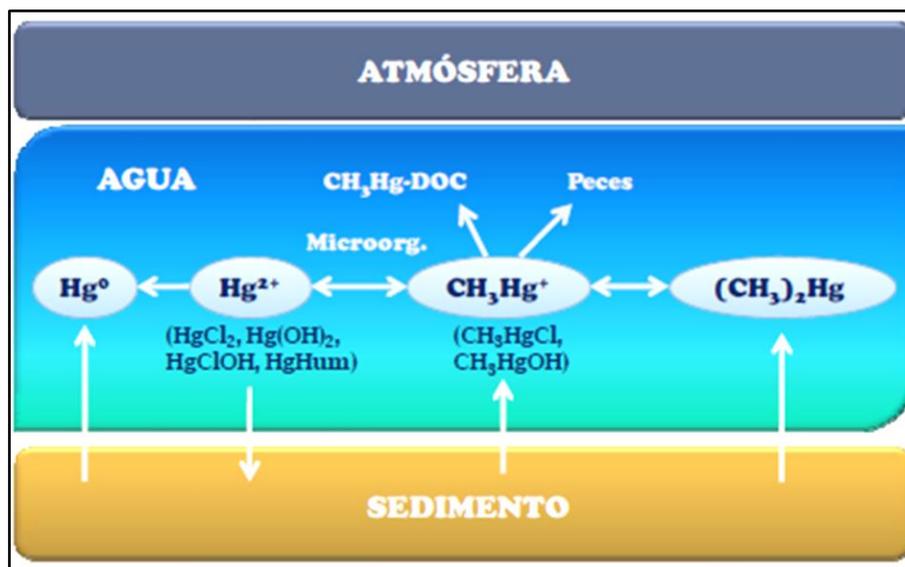


Foto 4. Principales transformaciones de las especies de mercurio en el medio acuático, tomado de (Vázquez, 2008).

Las condiciones generales para que el mercurio se encuentre en agua y sedimento son: fuerza química, potencial de hidrogeno (pH), potencial Redox (Eh) pero específicamente concentraciones altas de materia orgánica, ácidos orgánicos naturales, material particulado disponible en aguas superficiales para lograr la unión de metales y hacer posible un intercambio iónico. Las formas de Hg más comunes en agua son: Hg^{+2} , hidróxido de mercurio $Hg(OH)_2$ y Hg^0 , y complejos estables con ligandos orgánicos (Newman & McIntosh, 1991).

El Hg inorgánico que ha alcanzado las aguas superficiales o suelos, puede ser metilado por bacterias a la forma de dimetilmercurio cuando el azufre está presente en sedimentos; la cual es muy tóxica (WHO, 1989; Figueruelo y Marino, 2001).

También, su presencia está asociada con material particulado durante el transporte de aguas superficiales. Cuando los valores de pH están entre cinco y siete, las concentraciones de mercurio en el agua se ven incrementadas debido a la movilización que se genera de este metal en el suelo (Petersen, 1983 citado en Newman & McIntosh, 1991).

2.5.3 Bioacumulación y relación del mercurio con las poblaciones de macroinvertebrados acuáticos

El mercurio es bioacumulado por los organismos acuáticos, dado que su incorporación es más rápida que su eliminación (Market, 2007). El mercurio bioacumulado, principalmente en forma de metilmercurio, también se biomagnifica, lo que significa que la concentración del mercurio incrementa al pasar a un nivel superior en la cadena trófica (Bidone et al., 1997, Boudouw y Ribeyre 1997, Market 2007, como se citó en Molina et al, 2010, p. 9). La bioacumulación del Hg tiene lugar cuando este atraviesa las barreras biológicas que separan a los seres vivos de su ambiente y posteriormente se distribuye a los diferentes compartimentos tisulares e intracelulares (Boudou y Ribeyre 1997).

En los organismos acuáticos los principales órganos de asimilación del mercurio, son: las branquias, el recubrimiento cutáneo y el tracto digestivo, en cambio la eliminación está dada por vía urinaria, fecal y algunas glándulas de excreción, pero la biodisponibilidad del mercurio en los organismos acuáticos es muy heterogénea, ya que depende de la variabilidad de factores ecológicos y fisiológicos, tales como; estado de crecimiento, posición trófica, tamaño, biomasa, sexo, como también del comportamiento migratorio dependiendo de las especies (Meili 1997, Roulet y Maury-Brachet 2001 como se citó en Molina, 2010, p. 9).

De las diferentes formas de mercurio que pueden bioacumularse, el metilmercurio es una de las que se absorbe y acumula con mayor facilidad. Los peces adhieren eficientemente el metilmercurio, tal que en el músculo la acumulación de metilmercurio representa el 80% del mercurio total, aunque en otros órganos como el hígado o el riñón la concentración es aproximadamente el 20%. En otros organismos acuáticos, sin embargo, el porcentaje de metilmercurio es mucho más variable y depende de la localización y del tipo de organismo (Moreno, 2008, p. 25).

Aun cuando los niveles de mercurio sean bajos, estos pueden afectar la diversidad biológica y por lo tanto la salud ecológica. La respuesta de los macroinvertebrados a este tipo de contaminación se refleja en la composición de la comunidad, abundancia total y en la riqueza de especies. Aunque las concentraciones de metales pesados, incluyendo el mercurio, no sean altas, sus efectos se reflejarán en los cambios de la composición en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, donde la abundancia relativa y la riqueza de especies disminuyen con el aumento de metales pesados (Qu, Wu, Tang, Cai, & Park, 2010).

2.6 Valores de referencia de variables para agua y sedimento

Un valor de referencia representa la concentración de un componente que no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud humana cuando se consume durante toda una vida. Al establecer los valores de referencia, se tienen en cuenta las técnicas disponibles para controlar, eliminar o reducir la concentración del contaminante hasta el nivel deseado (tabla 1) (OMS, 2006).

2.6.1 Referencias de calidad de agua para uso de consumo humano

La calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito (Johnson, Lamb, Saul & Winter-Nelson, 1997). En Honduras, la Norma Técnica para la Calidad de Agua Potable existe desde el 31 de julio de 1995, y aprobada según acuerdo No. 84, entrando en vigencia el 04 de octubre de 1995.

2.6.2 Referencias estadounidenses de protección ambiental (USEPA) para la calidad de agua para uso de protección de la vida acuática

El uso del agua para la protección de la vida acuática, actualmente no está regulado en Honduras. En esta investigación se han adoptado las directrices propuestas por las Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG), Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CAPRE), Organización Mundial de la Salud (OMS) y USEPA. Estos criterios fueron establecidos para asegurar y proteger la biota acuática ante estresores antropogénicos como los metales tóxicos y cambios en parámetros fisicoquímicos.

2.6.3 Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG)

Estas referencias fueron creadas para facilitar la comunicación entre investigadores y tomadores de decisiones, con un lenguaje y figuras que permitan entender los resultados de los monitoreos hechos en campo proporcionando metas científicas para la calidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres (CEQG, 2016).

2.6.4 Normas CAPRE (Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana)

El Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana, en adelante “CAPRE”, Organismo Técnico Regional con sede permanente en San José, Costa Rica, conforme con sus estatutos elaboraron normas técnicas de control de calidad de productos en materia de agua potable y saneamiento entre los países miembros y afiliados, estableciendo la norma regional de calidad del agua para consumo humano. (CAPRE, 1994 P.2)

2.6.5 Valores guías Internacionales en agua y sedimento

A continuación (tabla 1) se describen los valores según su uso y matriz ambiental.

Tabla 1. Valores guías de concentración de mercurio (Hg total) para agua y sedimento

Consumo Humano		
Institución	Hg en agua	Hg en sedimento
OMS	0,006 (mg/l) inorgánico	
EPA	0,001(mg/l)	
CAPRE	0,001(mg/l)	
CEQG		
Vida Acuática		
OMS	0,006 (mg/l)	
EPA	0,0014 (mg/l)	
CAPRE		
*CEQG	0,026 (µg/l) inorgánico	0,17 (µg/g peso seco)
	0,004(µg/l) orgánico	

*CEQG: Guías de Calidad Ambiental Canadiense (por sus siglas en inglés, Canadian Environmental Quality Guidelines).

2.7 Variables fisicoquímicas de campo en agua superficial

2.7.1 Temperatura

La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias, aumentando la de los sólidos disueltos y disminuyendo la de los gases. Un aumento anormal (por causas no climáticas) de la temperatura del agua, suele tener su origen en el

vertido de aguas utilizadas en procesos industriales de intercambio de calor (Aznar, 2011).

2.7.2 Oxígeno Disuelto

Después de la temperatura, el oxígeno es uno de los factores más importantes que se debe medir en el cuerpo de agua (Roldán y Ramírez 2008). El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua y que es esencial para que los ríos y lagos sean considerados saludables. El nivel del oxígeno disuelto es un indicador del soporte que puede dar esta agua a la vida vegetal y animal. Usualmente, un nivel más alto de oxígeno indica agua de mejor calidad (Aznar, 2011).

2.7.3 pH

Es uno de los parámetros importantes que regula la mineralización, la solubilización y/o precipitación de compuestos inorgánicos en las distintas matrices ambientales (Tarradellas, 1996 como se citó en Kreeith, 1994). En el medio acuoso valores bajos de pH favorecen la solubilización del mercurio y valores altos su incorporación a la fase sedimentaria (Shang, et al., 1998).

2.7.4 Conductividad eléctrica

“Es un indicativo de las sales disueltas en el agua y mide la cantidad de iones especialmente de calcio, sodio, magnesio y fósforo” (Sierra, 2011, p. 60).

2.7.5 Turbidez

Según Sierra 2011, “es la capacidad que tiene el material suspendido en el agua para obstaculizar el paso de la luz, es producida por la erosión natural y por presencia de arcillas, arena y limos aportada por actividades antropogénicas” (p 55).

2.8 Macroinvertebrados acuáticos como indicadores biológicos

2.8.1 Definición de los macroinvertebrados acuáticos

Se consideran macroinvertebrados acuáticos las especies con un tamaño superior a los 500 μm . El término "macroinvertebrado" no responde a un concepto taxonómico. Es una delimitación convencional de grupos de animales invertebrados (Ladrera, 2012).

Según Lanza et al., 2000; Carranza y Fierro, 2001 (como se citó en Arrunátegui, 2016) los macroinvertebrados son organismos que viven asociados a distintos sustratos de un ecosistema acuático y que por su tamaño pueden ser observados a simple vista y capturados. Dentro de dichos grupos se identifican los platelmintos, anélidos, moluscos, crustáceos, ácaros e insectos siendo estos de sus mayores exponentes. Las taxa dentro de estos grupos de organismos poseen una amplia tolerancia y una gran gama de alimento, los cuales se clasifican según sus papeles en la ecología dentro de las corrientes como: herbívoros, detritívoros, omnívoros y carnívoros.

2.8.2 Organismos bioindicadores de calidad ecológica

Los métodos biológicos han adquirido importancia en la determinación de la calidad del agua, especialmente los que se encuentran relacionados con el estudio y análisis de la estructura de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos (Roldán, 1999, p. 376).

Ghetti & Bonazi (1981) consideran a los macroinvertebrados como “los mejores bioindicadores de la calidad del agua” (p 23). El uso de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de las condiciones ambientales de los sistemas lóticos se basa en que estos organismos presentan ciclos de vida más prolongados en relación a otros organismos acuáticos microscópicos, además de contar con poca movilidad (Valverde, Caicedo y Aguirre, 2009).

Los macroinvertebrados poseen una serie de características que los hacen un indicador ideal como: la abundancia, su amplia distribución, la facilidad de colecta, su elevada diversidad de especies permite un gran número de respuesta a distintos tipos de perturbaciones (grados de tolerancia), tanto físicas como químicas (contaminación orgánica, eutrofización, acidificación, alteración del hábitat, regulación de caudales, canalizaciones, etc.), además su facilidad de identificación en relación a otros grupos de organismos como los virus, bacterias entre otros (Roldán, 2003). “Estas características, permiten identificar y evaluar el grado de contaminación orgánica en el que se encuentra determinado ecosistema acuático” (Alba-Tercedor, 1996, p. 204-206).

Para utilizar el concepto de especies indicadoras, hay que tomar en cuenta que la presencia de una especie en un ambiente asegura la existencia de ciertas condiciones ambientales mínimas. Sin embargo, la ausencia de la especie no lo hace, ya que esta puede derivarse de factores especiales como barreras geográficas, ocupación de su nicho funcional, eventos de su ciclo biológico normal o a presiones ejercidas por intensos niveles de control biológico, como la depredación y/o el parasitismo (Johnson et al., 1993; citado por Sermeño et al., 2010, p. 8)

Rosemberg & Resh, 1993; citado en Gamboa, Reyes y Arrivillaga (2008) menciona que el concepto de bioindicador utilizado para la evaluación de la calidad de agua, es definido como: especie (o ensamblaje de especies) que poseen requerimientos particulares con relación a una o conjunto de variables físicas y químicas, tal que los cambios de presencia/ausencia, número, morfología o de conducta de esa especie en particular, indique que las variables físicas o químicas consideradas, se encuentran cerca de sus límites de tolerancia. (p.110) Lo que permite observar respuestas biológicas frente a perturbaciones ecológicas y que están referidas como organismos o sistemas biológicos que sirven para evaluar variaciones en la calidad ambiental (Gamboa, Reyes y Arrivillaga, 2008).

Un indicador biológico es ideal por los rangos de tolerancias ambientales (pH, conductividad, temperatura, y oxígeno), los organismos o poblaciones que presentan amplias tolerancias para diferentes condiciones ambientales y cuyos patrones de distribución y abundancia se ven afectados poco por variaciones del hábitat (Zúñiga, 2009, p. 180).

Prat et al., (2009) menciona que los macroinvertebrados tienen una especial importancia en los ecosistemas acuáticos, al constituir el componente de biomasa animal más importante en muchos tramos de ríos lo que les permite jugar un papel fundamental en la transferencia de energía desde los recursos basales hasta los consumidores superiores de las redes tróficas.

Es decir, a nivel de grupos van a consumir materia orgánica fabricada en el río por organismos fotosintéticos, y la materia orgánica procedente del ecosistema terrestre; la alteración de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos de los ecosistemas fluviales afecta directamente a animales como peces, aves, mamíferos y a los seres humanos. (Ladrera, Rievadevall y Prat 2013; como se citó en Arrunátegui, 2016, p. 3)

2.8.3 Índices de diversidad y calidad ecológica

A continuación, se mencionan los índices de diversidad biológica (riqueza de especies) y el índice biótico (límites de tolerancia), que fueron utilizados en esta investigación:

2.8.3.1 Índices de diversidad biológica

Índice de Simpson (D)

El índice de dominancia de Simpson (1949), considera la probabilidad de que dos individuos de la población seleccionados al azar sean de la misma especie. Cuanta más alta es la probabilidad, menos diversa es la comunidad. Es un índice relativamente insensible a especies raras, pero altamente sensibles para especies dominantes. Si se obtienen resultados desfavorables

en su cálculo puede ser indicador de impactos como contaminación orgánica y degradación de la morfología.

El índice muestra la posibilidad de que dos individuos al azar de una muestra correspondan a la misma especie.

$$D_{Si} = \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde pi es igual a la abundancia proporcional de la enésima especie; representa la probabilidad de que un individuo de la especie i esté presente en la muestra, siendo entonces la sumatoria de pi igual a 1. Mientras pi² se calcula elevándolo al cuadrado (Tomado de Villarreal et al., 2004, p.198).

Índice de diversidad de Shannon (H)

Este índice considera que los individuos se muestran al azar a partir de una población indefinidamente grande y que todas las especies que componen la comunidad o hábitat están representadas en la muestra. El mismo se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$H = -\sum P_i * \ln P_i \quad \text{Ecuación 2}$$

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

Dónde:

N= Número de individuos de todas las especies.

n_i= Abundancia para la especie i.

LnP_i= Logaritmo natural de P_i, que es la abundancia proporcional de la especie i, la cual implica obtener el número de individuos de la especie i dividido entre el número total de individuos de la muestra (Tomado del Manual de Métodos para el Desarrollo de Inventarios de Biodiversidad, 2004, p. 200).

2.8.3.2 Índices bióticos

Los índices bióticos son ampliamente utilizados en la evaluación de la calidad biológica de las aguas, en especial de los ríos. Estos índices asocian a los taxa presentes (familia, género, especie) con un valor numérico según su nivel de tolerancia. (Springer, 2010, p. 55)

Uno de los índices bióticos más utilizados en la región y que ha sido adaptado a los ambientes tropicales es el BMWP (Biological Monitoring Working Party), “el cual fue desarrollado inicialmente para Inglaterra y luego adaptado para España por Alba-Tercedor & Sanchez-Ortega (1988)” (Springer, 2010, p. 55).

El índice BMWP es de aplicación sencilla, solamente se suman los valores de tolerancia en relación a las Familias taxonómicas encontradas en cada sitio de muestreo, el resultado se ubica en la clasificación y se determina la calidad ecológica.

Otro índice ampliamente utilizado es el IBF (Índice Biótico de Familias) o FBI (Family Biotic Index, por sus siglas en ingles), “desarrollado por Hilsenhoff (1988), el cual además toma en cuenta las abundancias de cada familia” (Springer, 2010, p. 55). El IBF, “a diferencia del BMWP pondera el valor de tolerancia, ya que la cantidad de individuos recolectados se multiplica por el valor de tolerancia del taxón y se divide entre el total de individuos recolectados” (Springer, 2010, p. 55). Para esta investigación fue utilizado o aplicado el Índice Biótico a nivel de Familias modificado para El Salvador (IBF-SV-2010).

Índice biótico a nivel de familias (IBF-SV-2010)

“El Índice Biológico a nivel de Familias de macroinvertebrados acuáticos adaptado para El Salvador (IBF-SV-2010), tiene como base el método de cálculo, asignación de puntajes y escala de medición, propuestos por Hilsenhoff (1987)” (Sermeño et al., 2010, p.17).

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Este es un índice de carácter cuantitativo ya que toma en cuenta la cantidad de individuos encontrados por familia, la abundancia relativa y tiene un puntaje designado de acuerdo a la tolerancia o sensibilidad a la contaminación de materia orgánica presente en el agua (tabla 2) (Sermeño et al., 2010)

Tabla 2. Clasificación de la calidad del agua en función del valor IBF-SV, 2010 obtenido.

Rangos de Valor IBF-SV-2010	Categoría	Calidad del Agua	Interpretación del grado de contaminación orgánica
0.00 – 3.75	1	Excelente	Contaminación orgánica improbable.
3.76 – 4.25	2	Muy buena	Contaminación orgánica leve posible.
4.26 – 5.00	3	Buena	Alguna contaminación orgánica probable.
5.01 – 5.75	4	Regular	Contaminación orgánica bastante sustancial es probable.
5.76 – 6.50	5	Regular pobre	Contaminación sustancial probable.
6.51 – 7.25	6	Pobre	Contaminación muy sustancial probable.
7.26 – 10.00	7	Muy Pobre	Contaminación orgánica severa probable.

2.8.4 Macroinvertebrados acuáticos indicadores en el estudio

Phyllum: Arthropoda

Clase: Insecta / Orden: Hemiptera

Roldán, (1996) señala que los hemípteros son cosmopolitas, conociéndose por lo menos 3,000 especies alrededor del mundo; de las cuales 700 se encuentran en el trópico americano. Además, define a los Hemípteros como organismos conocidos comúnmente como chinches de agua; son insectos hemimetábolos, es decir, su metamorfosis es simple y gradual, todos los organismos acuáticos de este orden toman el oxígeno de la atmosfera, a excepción de las familias Naucoridae y Helotrephidae las cuales lo toman del agua. Además, menciona que dichos organismos viven en remansos de ríos, quebradas y pantanos. Son depredadores de insectos acuáticos y terrestres, las

especies de mayor tamaño se alimentan de peces y crustáceos. Margalef, (2014) expresa que estos organismos “viven en aguas estancadas siendo principalmente macrófagos” (p 513).

Clase: Insecta / Orden: Ephemeroptera

Roldán, (1996) menciona que los efemerópteros reciben este nombre debido a la vida corta o "efímera" que llevan como adultos. Algunos pueden vivir en este estado sólo cinco minutos. Su respiración la realizan a través de agallas, generalmente abdominales, las cuales varían de forma y número de acuerdo a la especie. Viven en aguas corrientes bien oxigenadas, muy pocas son resistentes a cierto grado de contaminación lo que los coloca como especies indicadores de buena calidad de agua.

“Todos los estadios ninfales son acuáticos, presentando dimorfismo sexual en los ojos con mayor desarrollo en los machos” (Domínguez y Fernández, 2009, p 56). “Muchas especies son recolectoras y se alimentan de una variedad de algas unicelulares y detritus; algunas especies son excavadoras en el fondo Estos organismos se encuentran adheridas a rocas, troncos o vegetación sumergida, muy pocas en fondos lodosos o arenosos” (Margalef, 2014, p 506).

Clase: Insecta/ Orden: Coleoptera

“Es el orden más numeroso que se conoce con 350,000 especies, de los cuales alrededor de 10,000 son acuáticos. Están asociados a agua bien oxigenada, y usualmente son fuente de alimento para peces y anfibios” (Domínguez y Fernández, 2009, p 411). Roldán, (1996) menciona que poseen un cuerpo compacto, viven en ambientes lenticos y loticos, en troncos, hojas en descomposición, piedras, grava y vegetación.

Brown (1997) como se cita en Gutiérrez-Fonseca, 2010). Menciona que “los escarabajos acuáticos son buenos indicadores de la calidad ecológica del agua y su entorno. Debido a su amplio rango de requerimientos ecológicos y

biológicos, los coleópteros pueden indicar contaminación por detergentes que rompen la tensión superficial que se forma en el plastrón” (p 2). “Algunos adultos de las Familias taxonómicas Distiscidae, Noteridae e Hydrophilidae tienen la capacidad de salir del agua si esta no cumple con sus las condiciones para vivir” (Gutierrez-Fonseca, 2010, p 2).

Phyllum: Mollusca Clase: Gastropoda

“Viven en ambientes con muchas sales, especialmente carbonato de calcio, para construir su concha, algunos organismos por ejemplo Physa pueden vivir en lugares con vegetación acuática y restos orgánicos. Son indicadores de mala calidad de agua” (Roldán, 1996, p. 213). Pennak (1978) expresa que “las familias Physa y Lymnea, suelen ser buenos carroñeros y omnívoros” (p 714).

2.9 Isótopos estables

La hidrología isotópica es utilizada en estudios relacionado con los recursos hídricos. Son herramientas actuales y eficaces para solucionar problemas relacionados con interconexiones hidráulicas, mezclas de agua, profundidad de circulación, localización de recargas y fuentes contaminantes (Peralta Vital, et al., 2015).

La precipitación es uno de los fenómenos que conforman el clima de una zona en común, siendo esta el componente principal y materia prima del ciclo hidrológico (Custodio y Llamas, 1976) (p 286). Las firmas de isótopos estables en la precipitación y el vapor de agua son indicadores útiles de la variabilidad del clima y proporcionan información crítica sobre los procesos hídricos regionales y mundiales (Sánchez et al., 2013). Los isótopos estables del agua, deuterio (^2H) y oxígeno-18 (^{18}O) proporcionan información sobre el origen del agua y sobre las relaciones entre distintos tipos de aguas (Bedmar et al., 1999, 18 p).

2.9.1 Modelo de masas de aire: HYSPLIT

La importancia de determinar el movimiento de las masas de aire radica en que proporciona información importante del origen de las precipitaciones y del transporte, dispersión, deposición de contaminantes y materiales peligrosos (Stein et al., 2015).

América Central posee una ubicación geográfica única, recibiendo entradas de humedad principalmente desde el mar Caribe central y sureste (Sánchez-Murillo & Birkel, 2016). En América Central la humedad fluye del Atlántico al Océano Pacífico debido a la favorable dirección del viento en el noreste y a las montañas relativamente bajas (Xu, Xies, Wang & Small, 2005).

En términos muy amplios el clima regional de Centroamérica está influenciado por grandes fuentes de calor latente, fuertes vientos del este, la alta temperatura subtropical del Atlántico Norte, altas temperaturas de la superficie del mar e intensas precipitaciones, Wang (2007), citado por Durán-Quezada et al., (2017, p.2).

2.9.2 Isótopos estables del agua

Los contenidos isotópicos de la lluvia están condicionados por diversos factores climáticos y geográficos (temperatura, grado de condensación de la masa nubosa, altitud, latitud). Una vez producida la lluvia y si el agua se infiltra rápidamente, los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ no varían, a diferencia de la química del agua no varían durante su tránsito en el acuífero (Araguás et al., 1992).

La mayor parte de las precipitaciones y aguas meteóricas del mundo tienen valores que se ajustan a una línea recta de ecuación $\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$. El término 10 se llama exceso de deuterio y se usa frecuentemente como índice de evaporación del agua. Su valor se calcula por la expresión $\delta D = \delta D - 8 \delta^{18}\text{O}$ (Araguás et al., 1992, p. 47).

En el caso del exceso de deuterio, se ha identificado como un indicador potencial de humedad reciclada. Por lo tanto, los fenómenos isotópicos de exceso junto con el monitoreo isotópico en aguas superficiales, pueden proporcionar estimaciones cuantitativas de la contribución de la humedad reciclada (Sánchez et al., 2013).

2.9.3 Línea meteórica global y local

Los contenidos isotópicos de un agua sometida a diferentes grados de evaporación se disponen a lo largo de una recta de 8. La pendiente de dicha recta depende fundamentalmente de la humedad relativa a la que tiene lugar la evaporación. Las variaciones en la composición de ^{18}O y deuterio de las aguas meteóricas son paralelas y se ajustan a una pendiente de valor 8, definiendo la Línea Mundial de las Aguas Meteóricas (GMWL) (Araguás et al., 1992; Craig, 1961).

III. METODOLOGÍA

3.1 Recopilación de información secundaria

La Información secundaria sobre las características biofísicas del área de estudio, fue recopilada a nivel de las instituciones locales pertinentes que han realizado estudios en la zona, tales como: el Centro de estudios y Control de Contaminantes (CESCCO), Instituto Hondureño de Geología y Minas (INHGEOMIN) Instituto de Conservación Forestal (ICF), Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT), Gobernanza Hídrica, Proyecto MIA NAP y mercurio y la alcaldía de El Corpus. Esta información incluyó diagnósticos, estudios, caracterizaciones e investigaciones diversas sobre hidrología, clima, geología, marco legal y minería.

3.2 Gira de reconocimiento

El levantamiento de información primaria fue realizado en abril del 2017 con el proposito de: conocer la zona y el yacimiento, contacto con los mineros, conocer sitios donde se extrae oro artesanalmente, determinar la cantidad y ubicación de los sitios de muestreo, identificar las matrices ambientales a muestrear y conocer el proceso de extracción artesanal de oro en la zona.

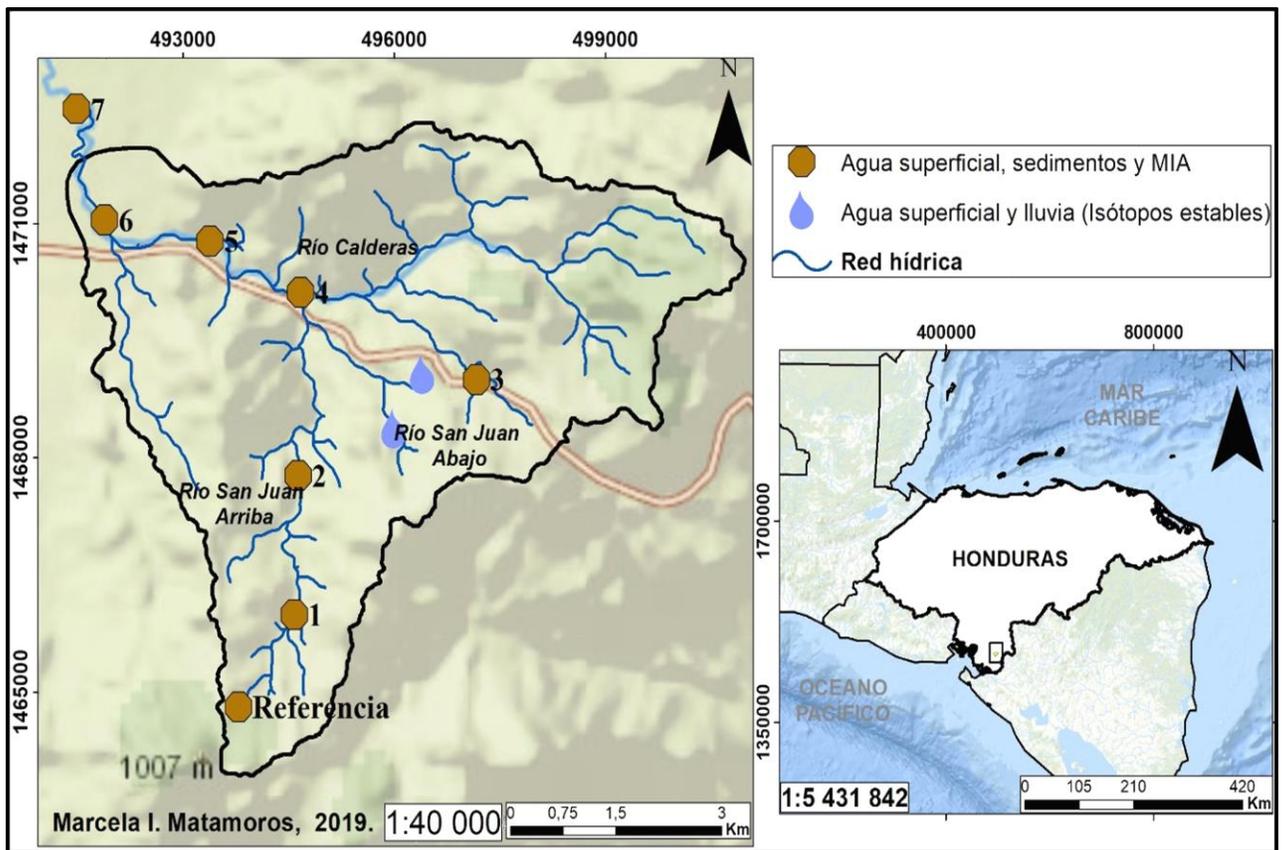
3.2.1 Selección de sitios y estrategia de muestreo

Para la selección de los sitios en donde se recolectaron las muestras ambientales (agua superficial, sedimentos, macroinvertebrados acuáticos, agua de lluvia), se tomó en cuenta la información obtenida en la gira de reconocimiento del area de estudio, mapas en los cuales fueron seleccionados ocho sitios de muestreo (mapa 3, tabla 3) considerando criterios de ubicación de las fuentes de contaminación, accesibilidad a los sitios, seguridad personal, distancia y tiempo de movilización entre sitios a muestrear, y las características del río (existencia de ríos tributarios, variaciones de caudal, granulometría

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

aparente del sedimento, presencia de materia orgánica en el lecho del río, existencias de meandros).

El muestreo de agua superficial, sedimentos y macroinvertebrados acuáticos (MIA) de la microcuenca del río Calderas, fue realizado en dos ocasiones: el 16 y 17 de abril 2018 correspondiendo con la temporada seca y el 30 y 31 de mayo 2018, representando un cambio de condiciones por las lluvias en ese mes.



Mapa 3. Sitios muestreados en la microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Tabla 3. Ubicación de sitios seleccionados a muestrear, El Corpus, Choluteca 2018.

Sitio muestreado	Coordenadas (UTM)		Elevación (m.s.n.m.)	Descripción del sitio
	Este	Norte		
Referencia	494170	146519	587	Sitio de referencia, donde fue asumido que no hay contaminación por mercurio. Se ubica a 2 km corriente arriba de la fuente de contaminación más cercana.
1	494181	146521	537	Río San Juan Arriba, por su ubicación tiene la influencia de dos ríos tributarios y cercanía a rastras mineras en operación.
2	494628	1466482	465	Río San Juan Arriba, en esta área se tiene influencia de rastras mineras en operación a 100 m.
3	497170	1468999	382	Quebrada El Sabroso, ubicada a 1 km de la comunidad de El Corpus.
4	494745	1469686	148	Río Calderas, comunidad San Juan Abajo, recibe la influencia del río San Juan Arriba, quebrada el Sabroso y la parte alta del río Calderas.
5	493388	1470775	125	Río Calderas, comunidad Calderas, recibe la influencia del Río San Juan Arriba, Quebrada el sabroso y la parte alta del río Calderas, a 100 metros arriba del punto en donde lavan oro.
6	492294	1470700	91	Río Calderas, comunidad Los Chagüites. Es la cuenca baja del río Calderas, a escasos metros hay presencia de rastras mineras en operación.
7	491489	1472465	67	Río Calderas, comunidad El Naranjal. Es la cuenca baja del río Calderas.

3.3 Levantamiento de datos para caracterización de las fuentes y las emisiones de mercurio

Fue tomada en cuenta la recopilación de información secundaria (sección 3.1). a su vez, fueron realizadas entrevistas abiertas con pobladores de la comunidad de El Corpus, Chaguites, San Juan Arriba y San Juan Abajo,

entre ellos niños, personas que se dedicaron a la minería, guiriseros y personal que en el pasado laboró en la alcaldía de El Corpus. Fue necesaria la gira de reconocimiento (sección 3.2) para conocer el funcionamiento de las rastras mineras, las distancias a la que estaban respecto a los ríos y la disposición de los residuos mineros.

3.4 Preparaciones previas al muestreo

Una simulación del muestreo real en el sitio 3 fue realizada el día 14 de abril de 2018 (foto 5) con el objetivo de fortalecer las capacidades de los técnicos de las unidades ambientales y colaboradores en el uso y calibración de equipos, recolecta de muestras llenado de formatos y en el desarrollo general del muestreo. También fué estimado el tiempo recorrido entre sitios seleccionados y el de duración de las mediciones y el de recolectas de agua, sedimentos y macroinvertebrados acuáticos.

Todos los frascos y bolsas para la recolecta de muestras fueron rotulados con viñetas que contuvieron información de identificación de la muestra y sitio, fecha, hora, coordenadas geográficas y método de preservación (foto 6).



Foto 5. Preparación y revisión de equipo en simulación de muestreo. Sitio 3, río San Juan Arriba, 14 abril 2018.



Foto 6. Frascos de plástico listos para ser usados en la colecta de muestras de agua superficial y de lluvia.

3.5 Medición de Caudal

La medición del caudal fue la primera que se realizó, siendo en el límite de la sección donde fue muestreada el agua y sedimentos (aguas abajo), para evitar alterar sus condiciones fisicoquímicas. Para la obtención de datos, fue usado un molinete tipo AA de la marca Rickly Hydrological Company, llevando a cabo el siguiente procedimiento:

1. Fue seleccionada una sección transversal en donde la morfología del río estuviese uniforme y su curso lo más lineal posible. Fue medido el ancho del río de la sección seleccionada y se dividió en tramos iguales (foto 7).
2. En cada sección vertical, se midió la profundidad para colocar el molinete al 60% de la profundidad total y posteriormente calcular el área por sección.
3. Con ayuda de los audífonos conectados al molinete, fueron contadas las revoluciones cada 30 segundos, siendo anotados consecuentemente los datos en la ficha de campo y posteriormente procesados en una hoja de cálculo en el programa Excel.



Foto 7. Medición de ancho del río para mediciones de caudal. Sitio 6, río Calderas. 31 mayo 2018.

3.6 Muestreo de agua superficial

Previa a la recolecta de las muestras de agua superficial, las variables fisicoquímicas en el agua superficial como el pH y la conductividad fueron medidas utilizando el equipo multiparamétrico (HANNA 98129), el potencial redox (Eh) con el equipo (HANNA HI 98120), la turbidez con el equipo (HACH-2100P) y la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y porcentaje de saturación de oxígeno con el multiparamétrico (ROMANIA HI 9147) (foto 8).



Foto 8. Medición de variables fisicoquímicas en agua superficial. Sitio 6, río Calderas, 31 mayo 2018.

El muestreo de agua superficial fue realizado de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Llenado de los formatos de campo: los formatos fueron llenados con los datos de la zona: comunidad, coordenadas, altitud, fecha y hora de muestreo e identificación del sitio muestreado.
2. Llenado de los formatos de campo: los formatos fueron llenados con los datos de la zona: comunidad, coordenadas, altitud, fecha y hora de muestreo e identificación del sitio muestreado.
3. Llenado de los formatos de campo: los formatos fueron llenados con los datos de la zona: comunidad, coordenadas, altitud, fecha y hora de muestreo e identificación del sitio muestreado.

4. Identificación de la muestra: los frascos de 1 l para análisis de Hg y un galón para análisis de sólidos suspendidos y disueltos fueron etiquetados con la información del código de la muestra, identificación del sitio, fecha y hora de muestreo, coordenadas y método de preservación.
5. Recolección de la muestra: los frascos fueron enjuagados tres veces con el agua del río y posteriormente la muestra fue recolectada (foto 9).
6. Preservación de la muestra: las muestras para análisis de Hg fueron preservadas con 2 ml de ácido nítrico (HNO_3) concentrado y las de análisis de sólidos únicamente con hielo.
7. Traslado de la muestra al laboratorio: Una vez preservadas, las muestras fueron depositadas en una bolsa plástica para evitar la contaminación cruzada entre ellas y fueron almacenadas con hielo hasta su recepción en el laboratorio.
8. En abril fueron muestreados siete sitios (no se muestreo el sitio 7 por no tener agua), donde fueron tomados los datos de caudal y variables fisicoquímicas de campo. En el caso del mercurio, fueron muestreados 5 sitios (referencia, 1,2,4 y 6). En mayo fueron muestreados ocho sitios donde fueron tomados los datos de caudal y variables fisicoquímicas de campo. En el caso del mercurio, fueron muestreados 5 sitios (referencia, 1,2,4 y 6).



Foto 9. Toma de muestra de agua superficial para análisis de mercurio y preservación en hielo, sitio 6, río Calderas, 17 abril 2018.

3.7 Muestreo de sedimentos

El muestreo de sedimentos fue realizado paralelamente al del agua superficial. La recolección de estas muestras fue para analizar mercurio total, materia orgánica, granulometría y variables fisicoquímicas, por lo que se procedió de la siguiente manera:

1. Delimitación del área a muestrear: una sección transversal del río fue seleccionada y medida para delimitar 10 m.
2. Recolecta de la muestra: tres muestras fueron recolectadas equidistantemente con una draga estilo Van Veen con 140 cm² de capacidad, a lo largo de la sección longitudinal del río. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en una bandeja plástica para ser homogenizadas manualmente con una espátula plástica.
3. División de la muestra: fueron conformadas tres sub muestras; dos de 500 g para el análisis de mercurio y materia orgánica y una de 1 000 g para el análisis de granulometría (foto 10).
4. Todas las muestras fueron rotuladas y guardadas en doble bolsa plásticas transparentes de calibre grueso.
5. Preservación de la muestra: todas las muestras fueron preservadas por congelación.
6. Para la medición de variables fisicoquímicas fueron pesados 20 g de la muestra de sedimento y depositado en un beaker de 100 ml, en el cual fueron añadidos 20 ml de agua destilada.
7. Traslado de la muestra al laboratorio: las muestras fueron depositadas en una bolsa plástica para evitar la contaminación cruzada entre ellas y fueron almacenadas con hielo hasta su recepción en el laboratorio.
8. Tanto en abril como en mayo fueron muestreados los ocho sitios, donde fueron tomadas las variables fisicoquímicas de campo y mercurio.



Foto 10. Recolecta de muestras de sedimento con draga. Sitio 2, río San Juan Arriba. 16 abril 2018.

3.8 Muestreo cualitativo multihabitat de macroinvertebrados acuáticos (Mia)

El muestreo de Mia fue realizado en los mismos sitios muestreados para agua superficial y sedimentos (mapa 3). Para llevar a cabo este muestreo multihabitat, fueron seleccionadas dos técnicas de recolecta: red D y lavado de cantos rodados.

Se trabajó con un muestreo en tiempo, siendo toda la técnica cualitativa. El material recolectado fue colocado en una bandeja plástica y tamizado a través de un tamiz de 250 micras. Los organismos y la materia orgánica fueron colocadas en una bolsa plástica previamente rotulada y preservadas en alcohol etílico al 80%. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en un termo con abundante hielo hasta trasportarlas al laboratorio donde fueron identificados taxonómicamente hasta el nivel de Familia y contados el número de individuos (foto 11).



Foto 11. Manipulación de red D. Sitio 6, río Calderas. 30 mayo 2018 y recolección de canto rodado. Sitio 7, río Calderas. 31 mayo 2018.

3.9 Muestreo de lluvia y agua superficial para análisis de isótopos estables

El sitio de recolección de agua superficial para análisis isotópico, fue la poza de O´Campo o también llamada “Los Pocitos” (mapa 3, tabla 4). Su selección se basó en la cercanía al centro de El Corpus, por ser perenne y poseer bajas concentraciones de salinidad, conductividad y turbidez, parámetros que en concentraciones elevadas interfieren en el análisis de isótopos estables (tabla 4).

Tabla 4. Ubicación geográfica de los pluviómetros para la recolección de agua de lluvia y agua superficial para análisis de isótopos estables. El Corpus, Choluteca 2018.

Matriz	Comunidad	Lugar	Este	Norte	Altitud (m.s.n.m.)
Lluvia	El Corpus	Barrio Nuevo	496237	1468853	400
Agua Superficial	El Corpus	Los Pocitos	495853	1468707	388

Al haber un evento de precipitación, el agua de lluvia fue recolectada en un pluviómetro convencional, según la guía para el muestreo de la precipitación de la OIEA/GNIP (OIEA/GNIP, 2014). La información sobre la duración del evento, cantidad de lluvia en milímetros (mm), hora de comienzo y final de la lluvia y medidas las variables fisicoquímicas fueron registrada debidamente. Las muestras fueron almacenadas a 5°C para evitar evaporación y fraccionamiento cinético.

En el caso de las muestras de agua superficial, fueron recolectadas una hora después finalizado el evento de precipitación. En el caso de las muestras que presentaron alta turbidez, se decantaron en refrigeración para que la muestra presentará menos sólidos en suspensión. Posteriormente la muestra fue transferida a un frasco hermético y conservada en refrigeración a 5°C. Tanto en la lluvia como en el agua superficial, fueron medidas las variables fisicoquímicas de campo y diariamente fueron registrados datos meteorológicos provenientes de una estación Davis Vantage Pro2.

3.10 Análisis de laboratorio

3.10.1 Agua superficial

El contenido de mercurio total en las muestras de agua superficial fue analizado en el laboratorio de Contaminantes Químicos del CESCOO (<http://www.miambiente.gob.hn/cescco>) a través del método EPA 7473 con referencia en los métodos de prueba para evaluar residuos sólidos, métodos físicos / químicos (SW-846).

Los análisis de sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales, en un total de 15 muestras de agua fueron analizados en el laboratorio de Calidad de aguas del CESCOO a través del método parte 2540 D (gravimétrico-secado a 103°-105°C para SST t parte 2540 C (Gravimétrico-secado a 180°C) para SDT con referencia en el método de Estandar Methods for the Examination of Water & Wastewater, 22th, 2012.

3.10.2 Agua de lluvia y agua superficial para análisis de isótopos estables

El total de muestras de agua de lluvia recolectadas fue de N=32 y las de agua superficial de N=35 entre abril y junio de 2018. Las muestras fueron analizadas en las instalaciones del Grupo de Investigación de Isótopos Estables de la Universidad Nacional de Costa Rica (<https://isotopes-tropics.com/isotopes-without-borders7>), utilizando un analizador láser de isótopos de agua Los Gatos Research IWA-45EP (Los Gatos Research, California, Estados Unidos de América). Las abundancias de isótopos estables se expresan como $\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H} = (R_s/R_{\text{std}} - 1) \cdot 1000$, donde R es la relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$ en una muestra o muestras (estándar) y se reporta en la notación delta (‰ -per mil) en relación con las normas de referencia del Promedio Estándar del Agua del Océano, preparado en Viena, también conocido como V-SMOW. El exceso de deuterio se calculó como $d = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$. La incertidumbre analítica fue de: $\pm 0,5$ (‰) (1σ) para $\delta^2\text{H} \pm 0,1$ (‰) (1σ) para $\delta^{18}\text{O}$.

Los datos obtenidos fueron tabulados en una hoja de cálculo de Excel y posteriormente se elaboraron mapas en el programa ArcGis 10,3. Para conocer el balance de masa y calcular la contribución de agua nueva en el río, se usaron los datos de conductividad eléctrica en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, de la lluvia, agua superficial y el caudal base, usando la fórmula:

$$CE_{\text{río}} - CE_{\text{Lluvia}} / CE_{\text{Caudal base}} - CE_{\text{río}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Las influencias de las trayectorias atmosféricas fueron determinadas usando el software HYSPLIT, que son datos meteorológicos obtenidos por el Global Data Assimilation System (GDAS) que genera condiciones iniciales para los pronósticos mundiales del clima (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés). Se eligieron las trayectorias hacia atrás o retrotrayectorias (Backward) tomando el modelo de velocidad vertical con un tiempo total de corrida de muestras de 48 horas.

En total, fueron determinadas N=32 trayectorias correspondientes a cada día de lluvia. Se subdividieron en tres grupos para facilitar el análisis, correspondiendo a los meses de abril, mayo y junio de 2018. Siguiendo el procedimiento de Sánchez et al, 2013, las trayectorias fueron descargadas en formato shape file para la generación de mapas en el software ArcGis 10,3.

3.10.3 Sedimento

El total de muestras de sedimento para el análisis de mercurio total correspondió a N=16. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de contaminantes metálicos del CIRA/UNAN-Managua (<http://www.cira.unan.edu.ni/index.php/fil-c-m/>) a través del método Espectrofotometría de Absorción Atómica por Generación de Vapor en Frío, con referencia E. Rothery, 1984. Operation Manual VGA-76, VARIAN, con un límite de detección de $0,002 \mu\text{g.g}^{-1}$.

En el caso del análisis de granulometría, el total de muestras para el análisis correspondió a N=16. Las muestras fueron analizadas en las instalaciones del Laboratorio de Edafología de la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua en su recinto universitario Pedro Arauz Palacios (RUPAP) utilizando el método de Bouyocos (foto 12) para determinar los porcentajes de las fracciones del suelo como arena, arcilla y limo a través de un densímetro.

Respecto al análisis de materia orgánica, el total de muestras correspondió a N=14. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Contaminantes Químicos del CESCO (<http://www.miambiente.gob.hn/cescco>) a través del método de calcinación, en la cual la muestra se incinera en una mufla a una temperatura entre 650 a 700°C durante 4 horas.



Foto 12. Preparación de la muestra y tamizado para análisis de granulometría. UNI/RUPAP 7 noviembre 2018.

3.10.4 Macroinvertebrados acuáticos

La identificación previa hasta la categoría taxonómica de Familia, fue realizada en el laboratorio de Hidrobiología de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH). Posteriormente, se realizó una pasantía (foto 13) en el laboratorio de Hidrobiología del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua) (<http://www.cira.unan.edu.ni/index.php/fil-hb/>), en el cual fueron verificadas las Familias taxonómicas, abundancia y fueron establecidos los Géneros.

La identificación taxonómica fue realizada mediante la observación directa en estereoscopio, microscopio y el uso de claves taxonómicas apropiadas para macroinvertebrados acuáticos (Pennak, 1978; Merrit, R. & Cummins, K., 1984; Roldán, 1996; Springer, M, 2006; Domínguez y Fernández, 2009).

Los datos fueron tabulados en Excel para calcular la calidad del agua aplicando el IBF-SV-2010. Así mismo, con el software Past 3, fueron calculados diferentes índices de diversidad (Simpson y Shannon). Para la generación de mapas, se utilizó el software ArcGis 10,3.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

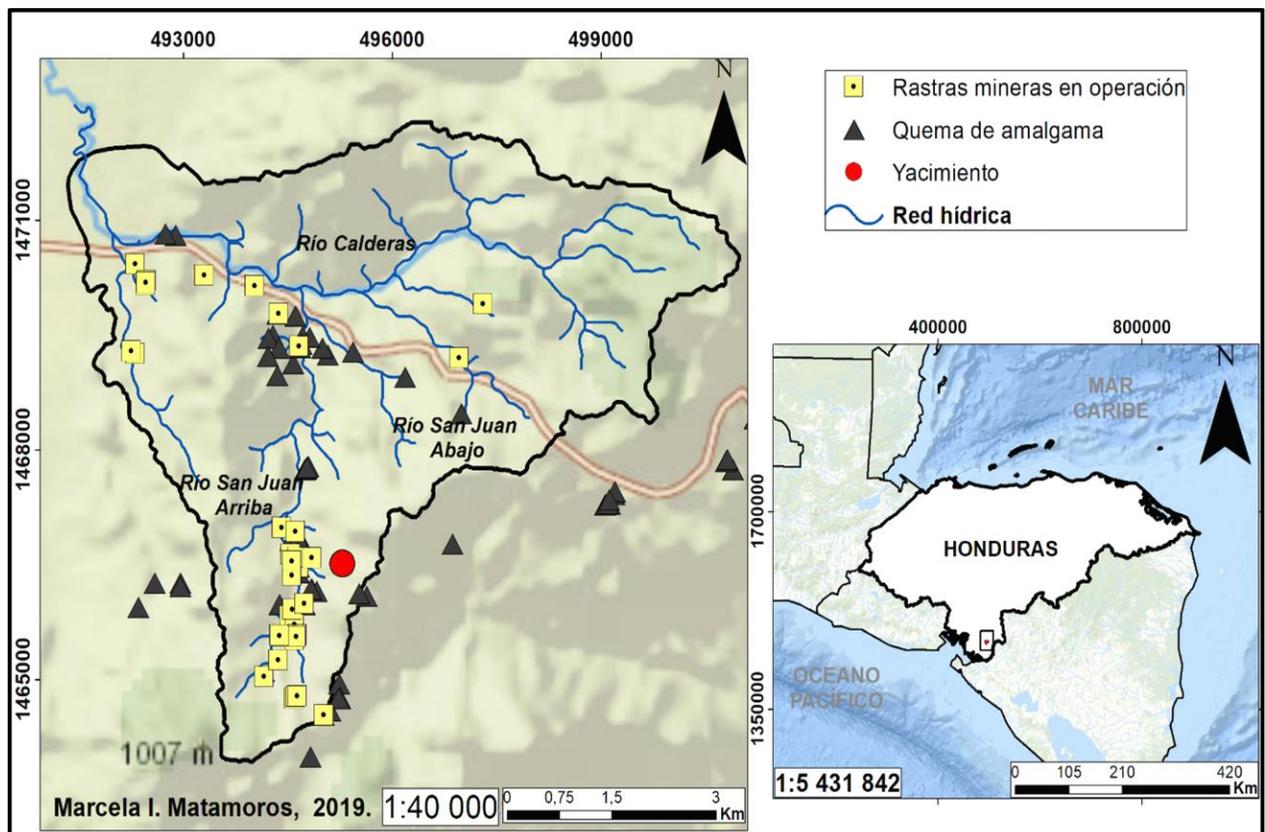


Foto 13. Identificación taxonómica de macroinvertebrados acuáticos, Laboratorio de Hidrobiología, CIRA/UNAN-Managua. 14 noviembre 2018.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fuentes y emisiones de mercurio en la microcuenca del río Calderas

Se logró identificar que en la parte alta de la microcuenca del río Calderas se ubican 26 rastras mineras, lo que equivale a un 68%, esto debido a la ubicación del yacimiento y de las casas de habitación que están cercanas al río San Juan Arriba. 12 rastras mineras que equivalen al 32% se ubican al oeste del río Calderas, siendo la cuenca baja, la cual recibe los sedimentos conteniendo mercurio (Hg) de la cuenca alta (mapa 4).



La producción aurífera diaria por rastra minera en El Corpus, corresponde a ~ 15 g de oro (Germer y Cáliz, 2017). Basado en esta información, se estima que en El Corpus se producen ~ 0,6 kg de oro diario a nivel de la microcuenca. De acuerdo a la producción aurífera derivada del proceso de purificación de broza, se ha estimado que diariamente es liberado a nivel de microcuenca 2,85 kg de Hg, de los cuales 1,99 Kg lo que equivale a un 70% es liberado directamente a las aguas superficiales y sedimentos y 0,86 Kg equivalente al 30% a la atmósfera a través de la quema de la amalgama. Con base en lo anterior, se considera que la mayor fuente de contaminación ambiental en El Corpus es la MAPE.

También se identificó, que la distancia entre las fuentes de contaminación y los ríos oscila desde 10 m a 1,5 km y debido a ello, la contaminación a nivel de cuenca se da por mecanismos de difusión y dispersión. Cabe destacar que el criterio erróneo de los mineros en El Corpus para construir y ubicar una rastra minera es que esta debe estar cercana al río aproximadamente entre 100 y 200 m, por la disponibilidad del recurso hídrico.

Los mineros, según sus años de experiencia, evalúan visualmente la molienda y de observar oro en la superficie, le agregan cal (CaCO_3) para que esta precipite junto a la amalgama y de esa manera la extracción de oro sea más eficiente, evitando con ello pérdidas de oro en el proceso del torcido.

Las rastras mineras son operadas 5 días a la semana durante todo el año. La cantidad de sacos de broza procesados varía en dependencia de la extracción diaria en el yacimiento “La Cuculmecha”, pudiendo variar entre 40 y 100 sacos. La molienda en la rastra minera, consiste en colocar la broza y agregarle agua para que las rocas plutónicas la trituren (foto 14 a), al finalizar la trituración, es agregado ~ 0,45 kg de mercurio y continúa la molienda para que sea posible la amalgamación entre el oro y el mercurio.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

El proceso y la recuperación del oro con molinetes (foto 14 b) es menos frecuente que con rastras mineras. En este proceso, se va depositando gradualmente la broza al molinete, y es triturada manualmente con un mazo. Al estar la broza finamente triturada se le agrega el mercurio en cantidades que varían en dependencia de las características de la broza.

En la etapa conocida como “torcido”, se lava el lodo producido en la molienda, para separar los sólidos de la amalgama a través de un fragmento de tela. Esta etapa representa la liberación de 487,46 kg de Hg anuales cuyo destino son los ríos, riachuelos, suelos, sedimentos y patios de casas.

Una vez obtenida la amalgama (Mezcla de oro y mercurio), esta es expuesta al calor para su fundición. Si la cantidad de oro extraído es abundante, se funde con acetileno y en caso de ser poca la cantidad de oro, se funde en comales, usualmente en los patios de las casas de habitación (foto 14 c). Es en esta etapa donde los vapores de mercurio son liberados a la atmósfera, lo cual representa anualmente unos 208,91 kg de Hg. Germer & Cáliz (2017), estimaron que la MAPE genera 46 430,00 toneladas anuales de arenilla (colas mineras) depositadas en la microcuenca del río Calderas.



Foto 14. a) Rastra minera artesanal. b) Molinete artesanal. c) Fundición de amalgama en comal. El Corpus, Choluteca 2018.

4.2 Variables fisicoquímicas en agua superficial

4.2.1 Temperatura

La temperatura del agua superficial en los sitios muestreados en la microcuenca del río Calderas, variaron entre los 25,10 °C y 32,90 °C con un promedio de 28,74 °C en el mes de abril 2018 (Anexo tabla 1a) . En el mes de mayo, las temperaturas oscilaron entre 25 °C y 31,70 °C con un promedio de 27,41 °C (Anexo tabla 1b).

En ambos muestreos, los valores más bajos de temperaturas fueron observados en la parte alta de la cuenca (sitios referencia, 1, 2 y 3), los cuales son favorecidos por una altitud correspondiente que está entre los 587 msnm y los 382 msnm, la abundante cobertura vegetal y la formación de nubosidad.

En la zona media de la cuenca donde se ubican los sitio 4 y 5, la altitud disminuye (148 a 125 m.s.n.m.) y por ende, aumenta la temperatura. Finalmente en la parte baja de la cuenca, representada por los sitios 6 y 7 se observaron las temperaturas más altas (por encima de 30 °C), esto también influenciado por la baja altitud (entre 91 msnm y 67 msnm) y por ser los sitios con menor cobertura vegetal y poca nubosidad, los cuales son factores importantes que influyen en las condiciones climáticas.

La temperatura es uno de los parámetros importantes que están relacionados con las condiciones fisicoquímicas del cuerpo de agua, debido a que se crean las condiciones para que se den las distintas reacciones químicas y al mismo tiempo es uno de los controladores en el particionamiento del mercurio entre la columna de agua y los sedimentos. Por otro lado, la temperatura también tiene una gran incidencia en los procesos de metilación del Hg en los ambientes acuáticos, ya que este proceso se da entre los 33 y 45°C, el cual es considerado ideal para estimar la producción bacteriana responsable del proceso de metilación (Wood, et al.,1968). Sin embargo, los valores de temperaturas obtenidos en los sitios muestreados en el río Calderas

son menores, por lo que disminuye la probabilidad que se de la metilación del mercurio, aunque no se debe descartar que pueda darse este proceso en algún evento en el que se den las condiciones fisicoquímicas favorables.

4.2.2 Oxígeno disuelto

En el mes de abril las concentraciones de oxígeno en los sitios muestreados, oscilaron entre los 1,90 mg/l y 4,60 mg/l con un promedio de 3,01 mg/l (Anexo tabla 1a); Las concentraciones más altas fueron observadas en las áreas (sitios 2, 4 y 5) donde se concentran el mayor número de rastras mineras cuyos efluentes generados en los procesos de extracción del oro y ricos en oxígeno se unen a las aguas de los ríos. Las concentraciones más bajas fueron observadas en los sitios de referencia (naciente río San Juan Arriba), 1 (río San Juan Arriba) y 3 (Quebrada el Sabroso) tributario del río Calderas (mapa 3). Estas condiciones son propias del periodo de verano, donde el caudal del río depende de la descarga de agua subterránea que según Custodio y Llamas, (1976) las concentraciones de oxígeno comunmente son menores a 2 mg/l.

En el mes de mayo las concentraciones de oxígeno disuelto en todos los sitios aumentaron, variando entre los 3,60 mg/l y los 4,70 mg/l con un promedio de 4,20 mg/l (Anexo tabla 1b). Esto debido a los aportes de agua de las precipitaciones que incorpora concentraciones de oxígeno por el contacto con el aire (Roldán y Ramírez, 2008).

Las concentraciones de oxígeno estan directamente relacionadas con la temperatura (SEDUE, 1989), de tal forma que su solubilidad disminuye al aumentar la temperatura; Sin embargo, en las mediciones realizadas en mayo no se observó este comportamiento, debido a que en los diferentes sitios muestreados las concentraciones del oxígeno disuelto fueron aumentando al igual que la temperatura. Es decir, las mediciones de temperaturas y concentraciones de oxígeno más bajas fueron observadas en la parte alta de la cuenca, cerca de las nacientes (Sitios referencia, 1 y 3). Tal como se mencionó previamente, esto es debido a las altitudes y las descargas de agua

subterránea. Sin embargo, en los sitios de la parte media y baja de la cuenca en donde las temperaturas son más altas, las concentraciones de oxígeno también aumentaron producto de la incorporación del oxígeno por interacción de las aguas con el aire y por los aportes de caudales resultado de las precipitaciones que a la vez cambian la dinámica fluvial del río.

Estudios realizados en agua dulce han mostrado que la metilación del mercurio se da principalmente en condiciones de baja concentración de oxígeno y es realizada principalmente por bacterias reductoras de sulfatos, siendo el metilmercurio producto de la metilación de mercurio iónico (PNUMA, 2002). A pesar de que los valores de oxígeno son bajos en los sitios muestreados, no se debe descartar que pueda darse este proceso en algún evento en el que se den las condiciones fisicoquímicas favorables en los ríos de la microcuenca del río Calderas.

4.2.3 Potencial de Hidrogeno (pH)

En el mes de abril el pH de las aguas de los ríos estudiados osciló entre 6,76 y 8,70 con un promedio de 7,82 unidades de pH. En la parte alta de la cuenca (sitios: referencia, 1 y 3), cerca de las nacientes, el pH de las aguas tienen los valores de pH más bajos (Anexo tablas 1a); Sin embargo, a partir del sitio 2 (ubicado cerca del 68% de las rastras mineras), el pH de las aguas aumenta hasta 8,72. Evidentemente este comportamiento obedece a la influencia de las colas mineras que contienen cantidades considerables de cal (CaO) disuelta, que es utilizada en los procesos de extracción del oro y que al incorporarse a los cuerpos de agua se transforma en hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), modificando así el pH.

En comparación con las mediciones de abril, en el mes de mayo el pH de las aguas disminuyó, oscilando entre valores de 6,46 a 7,94 con un promedio de 7,44 (Anexo tablas 1b). Los valores más bajos de pH fueron observados en el sitio referencia y en el 1, los cuales son los menos influenciados por las rastras mineras. Efectivamente en los demás sitios

(2,3,4,5,6,7) aún se observa, un incremento del valor del pH entre hasta 7,94 unidades de pH por los efluentes mineros. Sin embargo, es notoria una menor variación en los valores de este parámetro, resultado del cambio en la dinámica fluvial del río calderas y la dilución provocada por las precipitaciones que opacan el efecto de los efluentes mineros sobre las aguas de los ríos.

La tendencia del pH sobre el río Calderas es entre ligeramente ácido hacia ligeramente alcalino. Esta tendencia a la alcalinidad, puede influenciar para que el destino del mercurio descargado sobre el río Calderas sea la fase sedimentaria, ya que, para que el mercurio este disponible o disuelto, los valores de pH deben estar entre los 5,5 y 6,5 unidades de pH (Cogua, Campos y Duque, 2012).

Cabe resaltar, que el pH determina la solubilidad y disponibilidad biológica de las sustancias químicas presentes en el agua, incluyendo al mercurio (Kocman, et al., 2010), además bajo ciertas condiciones y a valores bajos de pH ($\text{pH} < 7$), el mercurio puede ser liberado de del sedimento hacia la columna de agua, o de la fracción particulada hacia la fracción soluble, quedando biodisponible para la biota

Finalmente, muchos estudios también incluyen la relación del pH en el favorecimiento de las condiciones físicas y químicas para que se den los procesos de metilación del Hg en los sedimentos (Parks, Sutton & Lutz, 1986), el cual debe estar entre 4,7 y 6,0 . Según los resultados de esta investigación se puede aseverar que la ocurrencia de este proceso es poco probable en los sitios muestreados.

4.2.4 Conductividad eléctrica

En abril, los valores de conductividad oscilaron entre $166 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y $428 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ con un promedio de $276 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ y en mayo oscilaron de 116 a $163 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ con un promedio de $140 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Anexo tablas 1a y 1b). Los valores habituales de conductividad menores a $50 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ indican aguas de bajo

contenido iónico y desde $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ hasta $2\ 000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ aguas fuertemente mineralizadas (Roldán y Ramírez, 2008).

En abril se observó que las aguas en la parte alta de la cuenca (sitios, referencia, 1 y 3) tienen valores de conductividad bajos. Sin embargo, a partir del sitio 2, es notorio un aumento de las conductividades debido a la influencia continua de los efluentes de las rastras mineras que aportan iones disueltos como resultados de la trituración de las rocas que contienen distintos minerales y por la cal que se utiliza en el proceso de recuperación del oro.

En mayo las conductividades de las aguas no fueron muy variables, esto atribuido a un aumento de los caudales generado por las precipitaciones del invierno, lo cual conlleva a que los iones sean diluidos, transportados o que haya una mezcla homogénea de los mismos a lo largo del cauce del río Calderas, ya que el flujo de agua es el principal agente de transporte, movilización y dispersión de los contaminantes derivados de la minería (Oyarzun, Higuera y Lilo, 2011).

4.2.5 Turbidez

Los valores de turbidez observados en abril variaron desde 2 hasta 3 395 unidades nefelométricas (anexo 1a) de turbidez (UNT). En los sitios ubicados cerca de las nacientes de los tributarios, (sitios de referencia, 1 y 3) se observaron los valores más bajos (2 a 35 UNT) de este parámetro. A partir del sitio 2, es donde se comienza a notar un incremento en la turbidez que puede ser atribuido a las múltiples actividades mineras que se realizan en el área, las mismas en las que se genera residuo de material particulado (sólidos suspendidos), coloidal, arenas, entre otros, que son resultado de las rocas trituradas y de suelo procesado en las rastras. Estos materiales, luego son depositados en el cuerpo de agua y posteriormente transportados por medio del drenaje superficial del río Calderas, razón por la que las lecturas de turbidez fueron aumentando cada vez más en los sitios posteriores.

En el mes de mayo, los valores de turbidez variaron entre 7 y 925 (UNT) (Anexo tablas 1a y 1b). Los valores más bajos fueron obtenidos siempre en los sitios cercanos a las nacientes; En el sitio 2, se obtuvo el valor más elevado por la continua deposición de material coloidal proveniente de las rastras. Sin embargo, por las precipitaciones y por ende, el aumento de los caudales, se da la movilización, dispersión y re-distribución de las partículas y efectivamente este material es arrastrado por todo el transcurso del río, razón que justifica la disminución de la turbidez en los sitios 4,5,6 y posteriormete el aumento de esta, en el sitio 7, en donde convergen los tributarios y se deposita el material particulado.

4.2.6 Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT)

En abril, los valores de concentración de sólidos suspendidos totales en variaron entre 13,50 y 10 209,09 mg/l con un promedio de 1 712,80 mg/l y en mayo entre 2,80 a 1 029,17 mg/l con un promedio de 222,59 mg/l (Anexo tabla 1a). En cuanto a los valores de sólidos disueltos totales, en abril variaron entre 127,00 y 16 793,91 mg/l con un promedio de 2 567,34 mg/l y en mayo desde 61,50 hasta 139,0 con un promedio de 112,56 mg/l (Anexo tablas 1a y 1b).

La cantidad y naturaleza de los sólidos presentes en el agua varía ampliamente, siendo en su mayoría sólidos disueltos los cuales consisten principalmente en sales y gases (Sierra, 2011; p 55). En los sitios referencia, 1 y 3, las aguas mostraron los valores más bajos de SST y SDT en ambos muestreos, debido a que están ubicados en áreas menos influenciadas por las actividades mineras. Sin embargo, las concentraciones de SST fueron menores que las de SDT, esto debido que estos sitios, están ubicados en áreas con bastante cobertura vegetal, poca actividad antropogénica y muy cercanos a las nacientes, razones que evita el transporte y deposición de sedimentos resultados de la erosión y/o la recepción de efluentes que contengan cantidades significativas de partículas coloidales.

Por otro lado, las concentraciones de sólidos disueltos son el resultado de la interacción del agua con el medio hidrogeológico lo que permite la disolución de ciertos elementos (Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Si) que pueden ser característicos de la naturaleza hidroquímica de la zona Custodio y Llamas (1976).

Los valores más elevados de concentración de SST y SDT en ambos muestreos fueron observados en el sitio 2, correspondiendo con la cercanía a las fuentes de contaminación, en donde se procesan de 40 a 100 sacos de brosa diariamente, lo que vendría a generar, enormes cantidades de sedimento y materia coloidal por la maceración de las rocas. Posteriormente, estos materiales, son depositados o arrastrados por la escorrentía al río Calderas, generando así cambios considerables en las características fisicoquímicas y de sólidos en este cuerpo de agua. Efectivamente, las concentraciones de STD en este sitio resultaron mayores a las de SST, debido a que en el proceso de trituración de las rocas se disuelve también una gran cantidad de iones que estas contienen por su naturaleza química y, por las fluctuaciones en las concentraciones de SST determinadas en los sitios 4,5 y 6 podemos decir que el material coloidal generado es sedimentado o transportado lentamente y a pocas distancias sobre el cauce del río.

Cabe resaltar que, en el mes de abril, el caudal del sitio 2 era mínimo ($0,014 \text{ m}^3/\text{s}$), por lo que la mayor cantidad de agua en este sitio provenía de las rastras mineras establecidas en la zona. Esto significa que existe una relación directa entre las concentraciones de los sólidos disueltos totales con el caudal del río Calderas (Anexo tabla 1d), tal que, el aumentó en el caudal ($0,242 \text{ m}^3/\text{s}$) en el mes de mayo producido por las lluvias, también produjo una dilución de los SDT, reflejado en una disminución de las concentraciones en mayo respecto a abril tanto en SST como en SDT (gráfico 1).

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Por otro lado, la correlación entre ambas variables (SST vs SDT) en abril fue de $r= 0,9953$ ($\alpha=0,05$) y en mayo de $r=0,7205$ ($\alpha=0,05$) (Anexo tablas 1c y 1d). En abril al haber un caudal base, hubo mayor concentración y movimiento lento de sólidos en todos los sitios muestreados.

En cambio, en el mes mayo, hubo lluvias que provocaron el aumento del caudal y, por lo tanto, la dilución y transporte rápido de los sólidos hacia la cuenca baja, por tal motivo, se observan concentraciones más bajas en mayo con respecto a abril en los sitios 4, 5 y 6, y un aumento en los SST en el sitio 7 que se debe a la recepción del material que ha sido transportado de la parte más alta de la cuenca.

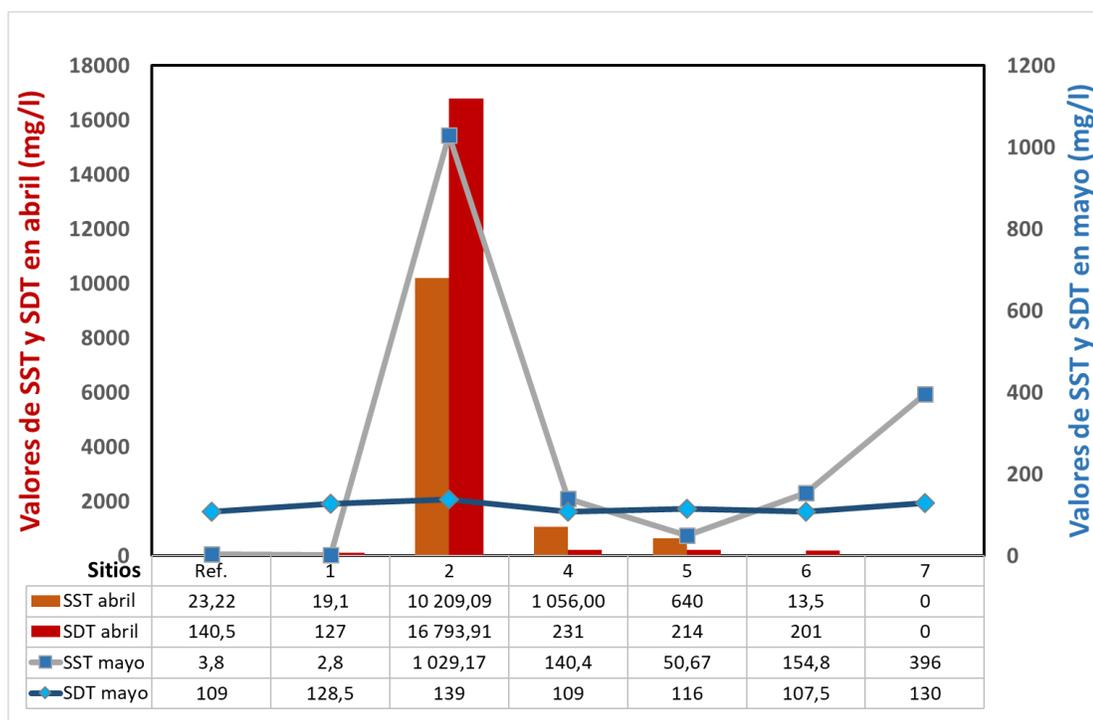


Gráfico 1. Concentraciones de sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales (mg/l) en las aguas de los ríos San Juan y Calderas. Abril y mayo 2018, microcuenca del río calderas.

En abril es obvio la alta sedimentación y acumulación longitudinal de los sólidos, proveniente de la actividad minera, dado al estado de caudal mínimo. Esto implica que los ríos sirven como reservorios de los desechos sólidos mineros ya que su movilidad es reducida en el período estival y

consecuentemente la contaminación tiene un tiempo de residencia más prolongada que en el período de precipitaciones. En el periodo de lluvias, al contrario, la fracción disuelta de sólidos es casi constante a lo largo del río lo que implica que hay una mayor movilidad de la contaminación hacia otras cuencas, incluso esta movilidad se ve favorecida por el proceso de resuspensión de los sedimentos a partir del sitio 4 producto del aumento en el flujo del río.

4.2.7 Concentraciones de mercurio en agua superficial

En abril, las concentraciones totales acuosas de mercurio (Hg-t) en el río San Juan Arriba y Calderas, variaron entre 0,022 y 4 928,00 mg/l, (Mapa 3, Anexo tabla 1a) y en mayo, variaron entre 0,084 y 0,372 mg/l (Mapa 3, Anexo tabla 1b), observándose en algunos de los sitios (sitios: referencia, 1 y 6) las concentraciones más altas en comparación con las observadas en el mes de abril.

De acuerdo a las directrices de las Normas Técnicas de vertidos de aguas residuales a cuerpos receptores de Honduras, la concentración máxima permisible de Hg-t en agua es de 0,01 mg/l. Según las Normas CAPRE y EPA, las concentraciones de Hg-t que se consideran potencialmente peligrosas para consumo humano es de 0,001 mg/l. Tomando como referencia estas regulaciones los ríos estudiados se consideran altamente contaminados y dada la magnitud de la contaminación por mercurio en la zona del Corpus, esta es una amenaza potencial para el ambiente y para la salud de las poblaciones humanas que están directa e indirectamente expuestas al mercurio.

En abril el río Calderas mantuvo un caudal base, el cual varió entre 0,001 y 0,027 m³/s. Por tanto, el mercurio contenido en las colas mineras y en general en los desechos mineros depositados directamente en los ríos, estaba reconcentrado, y dado que previo al muestreo de abril, no hubo lluvias en la zona por un periodo aproximado de 4 meses, se puede anticipar que los resultados expresan la contaminación máxima en el área estudiada. Por otro

lado, los datos revelan, que las concentraciones de mercurio total en agua superficial, están asociadas a las concentraciones de sólidos suspendidos totales $r= 0,9949$ ($\alpha= 0,05$) y sólidos disueltos totales $r=1,00$ ($\alpha= 0,05$) (Anexo tabla 1c); Esto indica que la presencia y el movimiento del mercurio en los ríos es facilitada por la presencia de los sólidos mineros que durante el proceso de recuperación del oro han interactuado química y físicamente con este metal tóxico.

En el mes de mayo se observaron cambios en las condiciones fisicoquímicas de las aguas del río Calderas como resultado de las precipitaciones que fueron 543 mm. Al ser superior a las registradas en abril en el que se recibieron solamente 78 mm. Por esta razón, hubo un aumento de caudal, generando cambios en la dinámica fluvial, y por ende en el comportamiento de las concentraciones de mercurio. El coeficiente de correlación entre las concentraciones de mercurio y las de los sólidos suspendidos totales fue de $r =0,8026$ ($\alpha=0,05$), en tanto con la de los sólidos disueltos totales de $r=0,8778$ ($\alpha=0,05$).

Las actividades mineras artesanales generalmente se realizan cerca del yacimiento, en esta área se han ubicado la mayor cantidad de las rastras (mapa 4); sin embargo, una pequeña cantidad de pobladores también realizan esta práctica en los alrededores de toda la cuenca, usando técnicas más simples como bateas, morteros, entre otros; Esta puede ser la razón, por la que en el sitio de referencia fue detectada la presencia del mercurio en concentraciones $> 0,07\text{mg/l}$ (mapa 5). Estos datos son de gran importancia y alarmantes, debido a que el sitio de referencia es la fuente abastecedora de agua para la comunidad de El Corpus, la misma que está siendo contaminada de mercurio lo que a la vez pone en riesgo la salud de la población.

El aumento de las concentraciones de Hg-t en agua, para el muestreo de mayo, está asociado a las lluvias, ya que la escorrentía contribuye al arrastre y deposición de suelos contaminados por mercurio y por el flujo turbulento que

recibe el cuerpo de agua, se da el transporte y resuspensión de los sedimentos, lo que permite que el mercurio adsorbido quede nuevamente disponible en la columna de agua.

Un ejemplo de esto, es el caso en el sitio 1, el cual en el mes de abril tuvo un caudal de 0,014 m³/s y una concentración de mercurio de 0,053 mg/l, este valor de caudal fue mayor al del sitio de referencia (0,001 m³/s) por lo que las concentraciones de mercurio en el sitio 1 tuvieron menores resultados de procesos de dilución. Sin embargo, en el mes de mayo la dinámica fue diferente, ya que las concentraciones en el sitio 1 aumentaron a 0,225 mg/l en relación al aumento de caudal que aporta más concentraciones de mercurio.

Las concentraciones más altas de mercurio total en ambos muestreos fueron observadas en las aguas del sitio 2 (mapa 5). En abril se observaron concentraciones de hasta 4 928,00 mg/l, estas se relacionan con las concentraciones de sólidos suspendidos totales (10 209,09 mg/l) y sólidos disueltos totales (16 793,91 mg/l) que fue el sitio, en donde también se determinaron las mayores concentraciones de sólidos; Estos resultados se debe a que en esta área denominada San Juan Arriba (mapa 4) están ubicadas el 68% de las rastras mineras existentes en la microcuenca y por lo tanto, representa el sitio en donde se da la recepción y/o acumulación de la mayoría de los desechos provenientes de estas actividades.

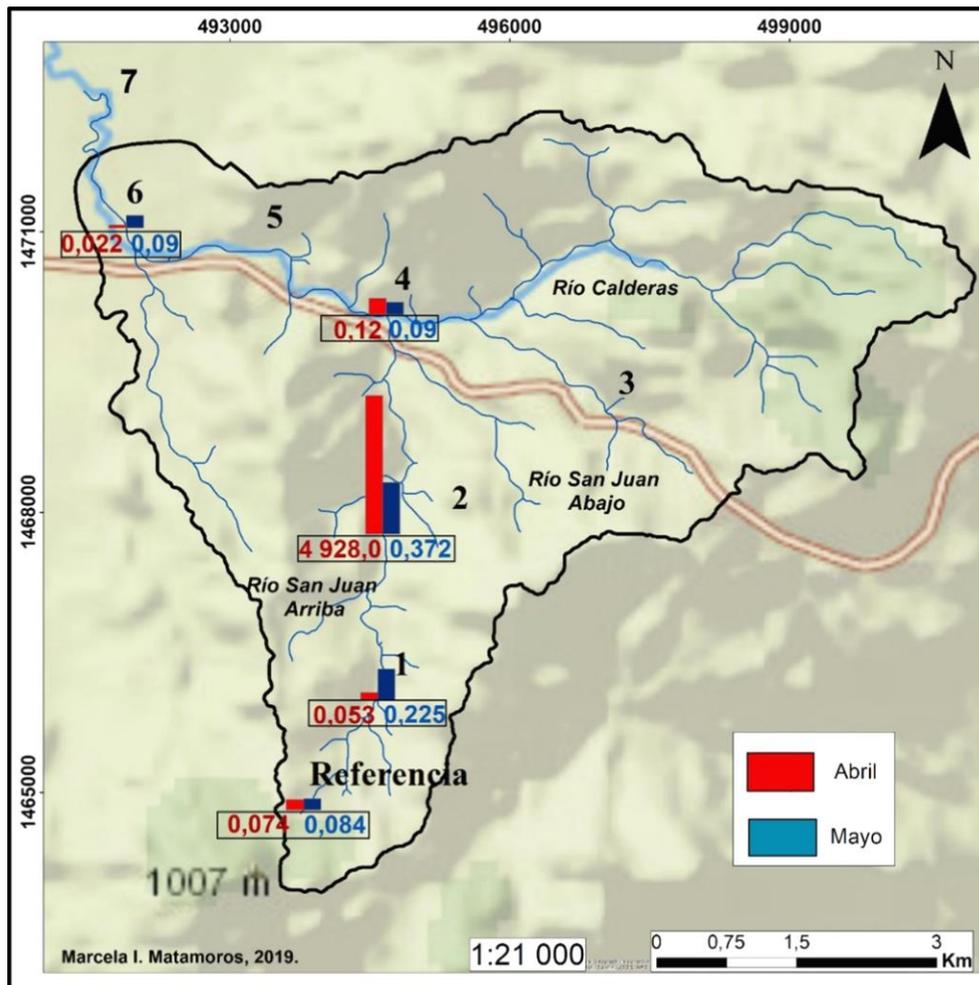
Cabe resaltar que, debido a las pocas precipitaciones de abril los residuos de las colas mineras de los meses anteriores (diciembre – abril) se fueron acumulando en el lecho del río o en las zonas riparias dando lugar a que eventualmente formaran parte de los materiales alóctonos que según sus características granulométricas tienden a ser lodos.

Referente al sitio 4, en el mes de abril las concentraciones de mercurio total fueron de 0,12 mg/l, siendo el sitio con las concentraciones más elevadas después de sitio 2. Esto se debe, a que es el punto de convergencia de dos tributarios, (río San Juan Arriba y río Calderas), los cuales transportan mercurio

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

proveniente de las actividades mineras de la parte alta de la cuenca y por otro lado, también está influenciado por actividades mineras locales, como es el ejemplo del sitio 6, que en el momento de muestreo, a una distancia de 100 m río arriba, se observó la actividad de los güiriseros, lo que pudo influenciar en las concentraciones de mercurio encontradas en este sitio (0,022 mg/l).

En el mes de mayo, las concentraciones de mercurio en el sitio 4, disminuyeron a 0,090 mg/l, esto pudo ser causa del aporte de las aguas provenientes de las lluvias, ya que el caudal en este sitio aumento a 1,346 m³/s, lo que fue significativamente superior al mes anterior.



Mapa 5. Concentraciones de mercurio total (mg/l) en las aguas de los ríos San Juan y Calderas. Abril y mayo del 2018. Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.

4.3 Variables fisicoquímicas en sedimentos

4.3.1 Temperatura

La temperatura del sedimento en el mes de abril en la microcuenca del río Calderas varió entre 27,60 °C y 33,70 °C con un promedio de 29,89 °C (anexo 2 tabla 2b). Las temperaturas más altas fueron registradas en los sitios ubicados en la parte baja de la cuenca (sitios 5 y 6) en donde existe menos cobertura vegetal y, por ende, la radiación influye más sobre el cuerpo de agua aumentando las temperaturas. En ese sentido, el sitio 6 presenta una temperatura favorable para que ocurra la metilación del mercurio (33,70°C) sin embargo, otras variables fisicoquímicas (pH, O₂) y biológicas (bacterias reductoras de sulfato) deben prestar las condiciones para su determinación.

Cabe mencionar, que en el sitio 2 también se notó un aumento de temperatura (31,05 °C) por la influencia de las colas mineras.

En mayo, las temperaturas tuvieron una leve disminución variando entre 26,45 °C y 31,75 °C con un promedio de 29,27 °C (anexo 2 tabla 2b), observándose las temperaturas más bajas en la parte alta de la cuenca la cual tiene mayor cobertura vegetal y, por lo tanto, esta menos influenciada por la radiación que los sitios que están ubicados en la parte baja.

4.3.2 Potencial de Hidrógeno (pH)

Los pH en los sitios muestreados para el mes de abril variaron entre 6,80 a 8,81 con un promedio de 7,66 unidades de pH. Los pH de los sedimentos en los sitios de la parte alta (Referencia, Sitio 1) fueron los valores más bajos, relacionados a la poca actividad minera que se realiza en esa zona. Por otro lado, el valor más elevado corresponde al sitio 2, que como se ha descrito, es el sitio más influenciado por las rastras mineras, las cuales en el proceso de maceración utilizan cal (CaO) para precipitar el oro y esto, posteriormente es liberado y trasladado por medio de las colas mineras al río, provocando las formaciones de complejos carbonatados, aluminosilicatos, óxidos de hierro o

formando complejos orgánicos (Triverdi et al., 2000, citado por Peluso, 2011) que a la vez modifican el pH.

En mayo los valores de pH observados son inferiores a los observados en abril, variando entre 6,80 y 7,85 con un promedio de 7,20. La razón de esto, es porque el aumento de los caudales resuspende los sedimentos removiendo a la vez complejos carbonatados o hidróxidos presentes en esta matriz, la cual está casi totalmente conformada por los desechos de las rastras.

Cabe resaltar que los valores observados de pH en todos los sitios y en ambos muestreos, condicionan al cuerpo de agua en una transición de ligeramente ácido a ligeramente alcalino, lo que beneficia los procesos de adsorción que a la vez serían los responsables de la retención del mercurio en la fase sedimentaria.

4.3.3 Materia orgánica y granulometría

El porcentaje de materia orgánica en el sedimento colectado en abril varió entre 4,26 y 11,60% con un promedio de 7,23%. En el mes de mayo, los porcentajes fueron inferiores variando entre 2,71 y 5,82%. Esto indica que probablemente el 50% del contenido de materia orgánica y, por tanto, del mercurio adsorbido a este sustrato, fue removido de los sedimentos y transportado por el aumento del caudal en los ríos.

Respecto a la granulometría de los sedimentos los porcentajes de arena son mayores (grafico 2 y 3, anexo Tabla 2.a) que los porcentajes de limo y arcilla en todos los sitios muestreados, lo que indica el predominio del material alóctono depositado al río principalmente por las rastras mineras que generan este tipo de material por trituración de las rocas en el proceso de molienda.

La composición granulométrica del sedimento indica en muchos casos la distribución espacial y estructural de la comunidad zoobentónica. Los porcentajes de las fracciones de arena, limo y arcilla constituyen variables

explicativas más eficientes que las físicas y químicas, para estudios de la distribución de macroinvertebrados bentónicos (Callisto y Esteves, 1996).

Cabe resaltar que, en el mes de abril, los sedimentos de los sitios 4, 5 (cuenca media) 6 y 7 (cuenca baja) tienen una cantidad considerable de arcillas (8,13 % a 25,92%) y de limo (10,75% a 38,61%), mientras que en mayo la fracción de arcilla en los sedimentos de esos mismos sitios disminuyó significativamente hasta un máximo de 7,61%, debido a la resuspensión de esta fracción y por ser una fracción más pequeña y liviana puede ser transportada con mayor facilidad que las arenas.

Según los resultados obtenidos (anexo 2, tablas 2.c y 2.d) no existe una relación lineal entre la materia orgánica, el tamaño de las partículas del sedimento y las concentraciones de mercurio total. Lo anterior es asociado a la dinámica de deposición de sedimentos, donde la broza molida proviene del yacimiento común y la variabilidad del flujo del río.

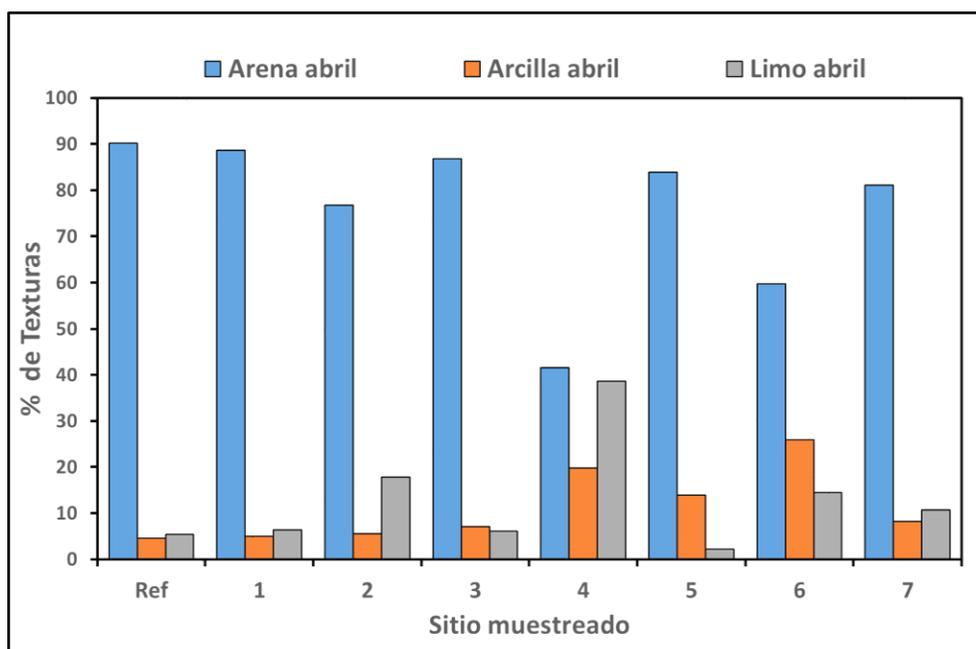


Gráfico 2. Textura (%) de los sedimentos muestreados en abril 2018. Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.

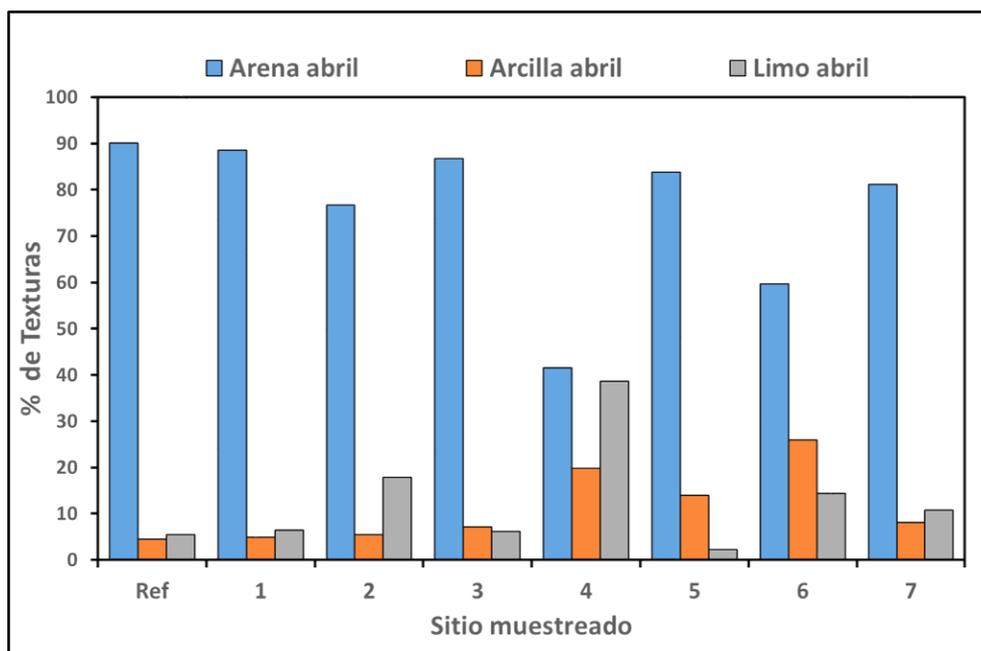


Gráfico 3. Textura (%) de los sedimentos muestreados en mayo 2018. Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.

4.3.4 Concentraciones de mercurio en sedimentos

Las concentraciones de mercurio total (Hg-t) en sedimento, en el río San Juan Arriba y Calderas variaron desde 261,955 $\mu\text{g/g}$ hasta los 2 773,199 $\mu\text{g/g}$ en abril, mientras que, en mayo, oscilaron entre 268,355 $\mu\text{g/g}$ hasta 877,142 $\mu\text{g/g}$ (anexo 2.b). Shang et al., (1998) sostiene que los sedimentos tienen un rol importante para la biogeoquímica del Hg en ecosistemas acuáticos. La metilación del Hg ha demostrado ser más rápida en los sedimentos superficiales, donde la actividad microbiana es más alta.

La variación encontrada en el área de estudio sugiere una retención muy heterogénea del mercurio en los sedimentos y de ser favorables las variables fisicoquímicas pudiese darse la metilación del Hg en los sedimentos muestreados, sin embargo, solo un sitio en ambos muestreos (sitio 6 en abril 201), mostró temperaturas favorables (33,70°C) para llevar a cabo este proceso, pero no siendo así en el caso del pH, ya que esa variable sufrió cambios por la adición de cal en el proceso de molienda (anexo 2b).

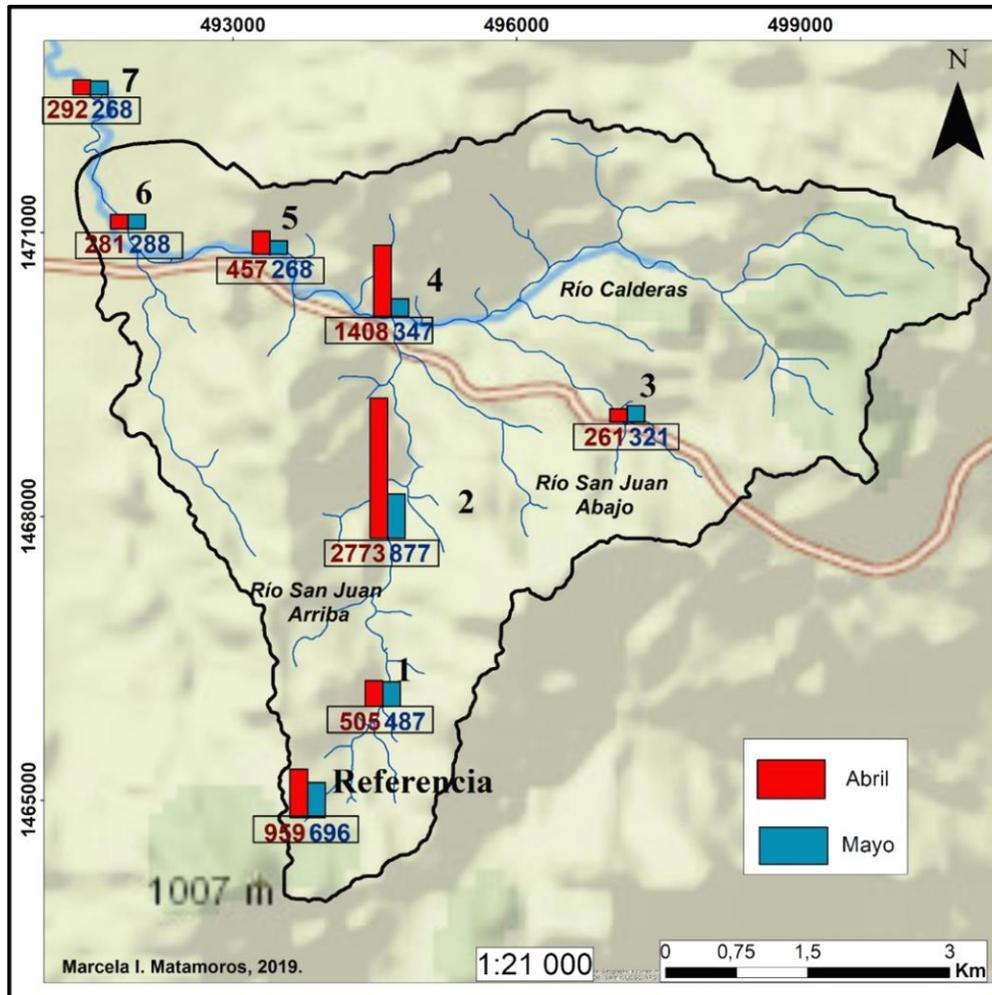
En Honduras no hay normas ni directrices que regulen la calidad de los sedimentos, por ello los resultados son comparados con las normas (CEQG, 2016)., que admite un máximo permisible de concentraciones de Hg-t de 0,17 µg/g para la protección de la vida acuática. Basado en esta norma, se puede observar que aún la concentración mínima de mercurio en los sedimentos es tres órdenes de magnitud superior al valor de las normas (CEQG, 2016)., (mapa 6, sitio 3). Estos resultados sugieren que los sedimentos, cuya naturaleza evidentemente proviene de los desechos sólidos generados por la actividad minera, son un sustrato para la retención del mercurio y una fuente de exposición para los organismos acuáticos (Picado et al., 2010).

Las bajas precipitaciones de diciembre 2017 a abril 2018 en El Corpus, limitó el transporte y dilución de las concentraciones de mercurio presente en las colas mineras, lo que con lleva a que una gran cantidad de mercurio se encontré confinado en la fase sedimentaria (mapa 6) tal como en otros ríos afectados por las MAPE (Picado & Bengtson, 2012). Las concentraciones de mercurio se ven fraccionada entre la fase acuosa, que es la que mayormente se moviliza a largas distancias aguas abajo, y en la fase particulada que es la que sedimenta por tanto las concentraciones de mercurio en el sedimento superan a las concentraciones acuosas (Picado & Bengson, 2012),

La influencia que tienen las variables fisicoquímicas sobre las concentraciones de mercurio en los sedimentos (anexo 2.c y 2.d), esta expresada en las correlaciones lineales entre estas variables. Estas correlaciones explican el comportamiento y la acumulación del mercurio en el lecho de los ríos. Los metales asociados a la fase particulada, efectivamente se sedimentan formando parte del lecho del río (Rand et al., 1995; Walker et al., 2006, citado por Peluso, 2011). Por tanto, la contaminación generada en las rastras mineras (mapa 6) es más evidente en la fase sedimentaria y con mayor intensidad en aquellos sitios donde esta actividad tiene mayor influencia, siendo

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

el caso del sitio 2, que es donde hay mayor cantidad de rastras mineras en operación.



Mapa 6. Concentraciones de mercurio total en sedimentos ($\mu\text{g/g}$), recolectados en abril y mayo del 2018 (sitios: referencia, 1 a 7). Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.

Dado que el material particulado es el principal medio de transporte de la mayoría de los compuestos químicos (Mackay, 2001, citado por peluso, 2011.), en el sitio 5 se refleja el transporte del mercurio proveniente de los desechos de las rastras mineras del río San Juan Arriba y de la parte alta del río Calderas. Debido a esto, en el mes de abril el sitio 4 fue el sitio con las concentraciones de mercurio más elevada (mapa 6), sin embargo, en mayo disminuye sustancialmente por efecto de transporte y dilución provocado por las lluvias

(mapa 6). El sitio 7, demuestra que por efectos de transporte del mercurio se está contaminando más allá de la cuenca baja, trascendiendo la microcuenca del río Calderas, ya que en ambos muestreos se encontraron concentraciones que sobrepasan los valores límites de las normas internacionales.

4.4 Macroinvertebrados acuáticos (Mia) como Indicadores biológicos de calidad de las aguas superficiales

4.4.1 Composición Taxonómica y abundancia numérica

Un total de 24 Familias con 35 Géneros de macroinvertebrados acuáticos fueron identificados en sustratos de canto rodado y hojarasca en los 8 sitios muestreados en los ríos San Juan Arriba y Calderas (mapa 3). En abril (época seca) fueron recolectados 194 organismos y en mayo (época lluviosa) 81 individuos.

La Clase dominante fue Insecta, dentro de esta, los grupos que prevalecieron fueron los Ordenes Hemiptera y Coleoptera, cada uno constituido por cinco Géneros taxonómicos. En el caso de los Hemípteros, estuvo compuesto por las Familias Veliidae, Belostomatidae, Naucoridae, Notonectidae y Gerridae y en los Coleópteros las Familias Elmidae, Hydrophilidae, Dytiscidae, Curculionidae y Scirtidae (tabla 5).

En el gráfico 4 se muestran los aportes totales de taxa y número de organismos notándose que en abril en el sitio de referencia fueron recolectados más organismos (64), siendo los principales representantes las Familias Leptohyphidae con una abundancia de 36% y Physidae con un 28%. En mayo, la cantidad de organismos recolectados disminuye a 15 individuos, predominando la Familia Belostomatidae con una abundancia de 27% y las Familias Leptophlebiidae, Coenagrionidae e Hidrophylidae con un 13% cada una.

En cuanto al patrón de distribución de los macroinvertebrados acuáticos indicadores de calidad de aguas, en la cuenca alta se observó mayor

predominancia de taxa sin embargo, en su mayoría, son indicadoras de mala calidad de aguas. También, en los sitios donde hay mayor influencia antropogénica de descarga de aguas residuales domésticas, predominó la Familia Veliidae tanto en abril como en mayo (mapa 7 y 8).

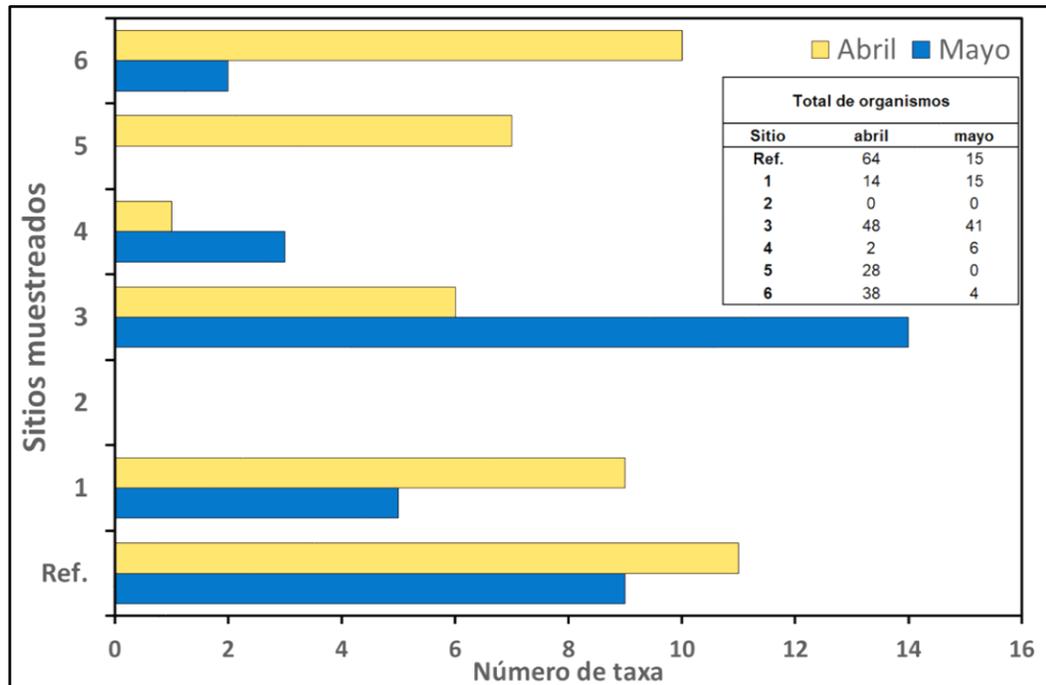


Gráfico 4. Número de taxa y presencia de macroinvertebrados acuáticos. en los ríos San Juan Arriba y Calderas., abril y mayo, 2018. El Corpus Choluteca.

Los fondos arenosos albergan pocas especies, con pocos individuos por especie, en cambio los pedregosos suelen ser más ricos, en especial cuando son rocas grandes, sin embargo, la fauna es aún más diversa y difiere considerablemente de la fauna de otros sustratos cuando hay vegetación en el lecho de los cuerpos de agua (Rivera, 2004). En ese sentido, la granulometría en todos los sitios muestreados fue principalmente arena, con variaciones entre la arcilla y limo y en todos los sitios muestreados hubo influencia de las colas mineras depositadas en los ríos en cuenca alta y baja.

En el sitio 1, en abril fueron recolectados 14 organismos, predominando las Familias Veliidae y Planaridae con una abundancia relativa de 29% cada una (mapa 7). En mayo, debido a la mejora en las concentraciones de oxígeno

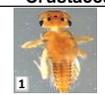
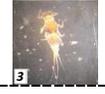
disuelto (2,5 mg/l O₂ en abril y 3,7 mg/l O₂ en mayo) fueron recolectados 15 organismos asociados a la mejora en las concentraciones de oxígeno, siendo estos la Familia Thiaridae (40%) y Coenagrionidae (20%).

En el sitio 2 no hubo presencia de Mia, relacionado a los altos valores de mercurio encontradas y al impacto directo de las rastras mineras en operación, que estaban a 100 m del sitio de muestreo, por lo que en abril el agua del caudal base era proveniente de los vertidos provenientes de las rastras mineras en operación, por lo que el agua del río tenía un aspecto semejante a lodo, impidiendo con ello el crecimiento de la biota acuática. En el caso de mayo, a pesar de haber aumentado el caudal, siempre hubo altas concentraciones de sólidos disueltos, suspendidos y turbidez (anexo 1b), impidiendo que en ese sitio hubiera Mia, aunado a ello el aumento de la arenilla y arcilla proveniente con las lluvias.

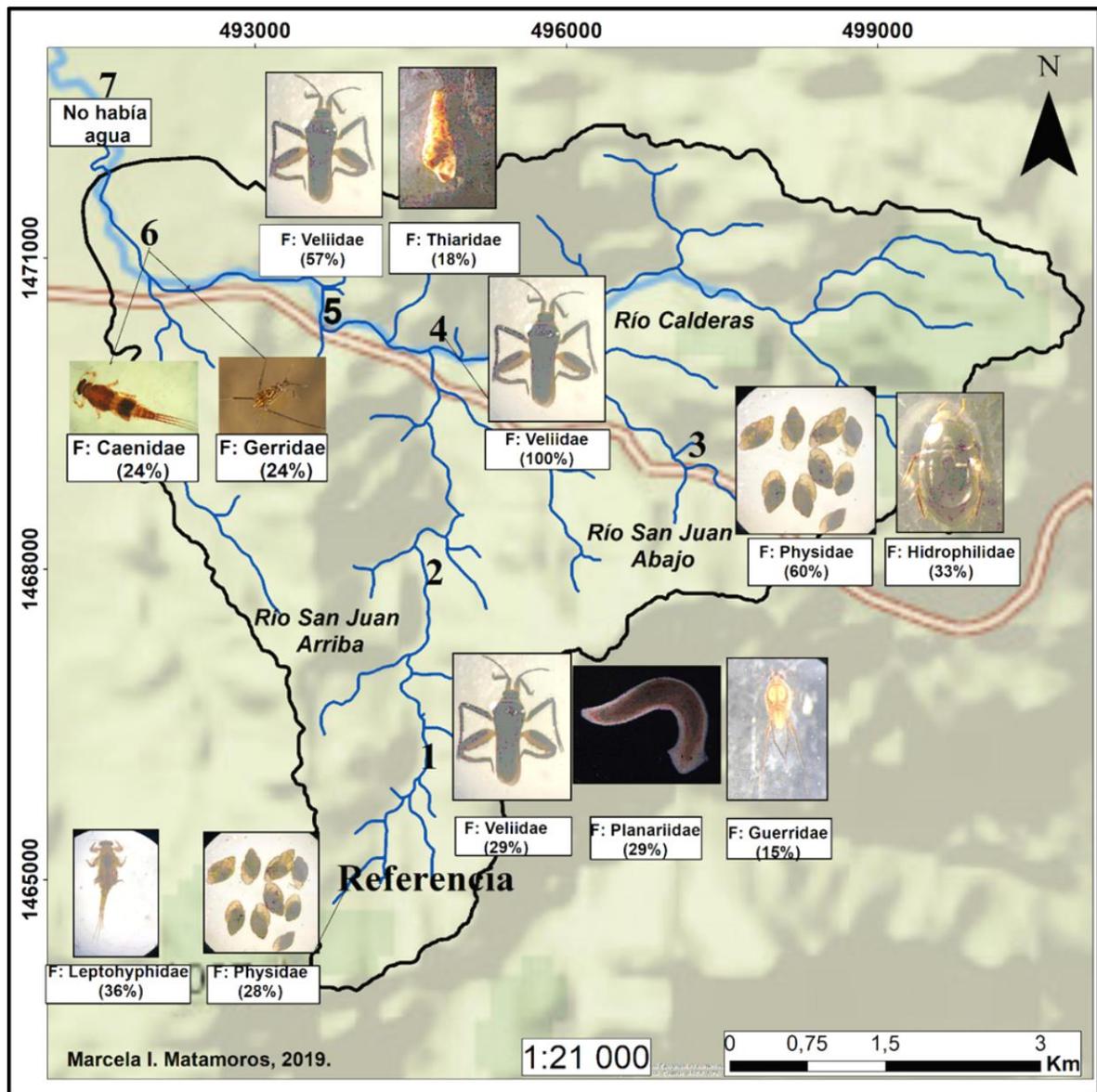
En abril fueron recolectados 48 organismos en el sitio 3, donde los moluscos de la Familia Physidae representaron un 60% de abundancia con organismos del Género *Physa* sp. En mayo, con la presencia de las lluvias, las sales en el agua fueron disueltas, y hubo menos representantes de los moluscos, encontrándose un 20% de abundancia relativa a organismos del Género *Simulium* sp. y con un 17% planarias con el Género *Dugesia* sp. (mapa 7 y 8). Respecto al sitio 4 en abril fueron recolectados únicamente 2 organismos de la Familia Veliidae (Género *Rhagovelia* sp.) por ello su abundancia relativa fue del 100%. En mayo hubo una riqueza de 6 sin embargo siempre predominó el mismo organismo con una abundancia relativa del 83%. Respecto al sitio 5, en abril la mayor abundancia relativa del 57% por organismos de la Familia Veliidae, con el Género *Rhagovelia* sp. y por única vez en los sitios en ambos muestreos, organismos de la Familia Thiaridae, con *Melanoides tuberculata* con un 18%.

Tabla 5. Riqueza taxonómica observada en los ríos San Juan Arriba y Calderas (El Corpus, Choluteca) en los meses de abril y mayo 2018.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

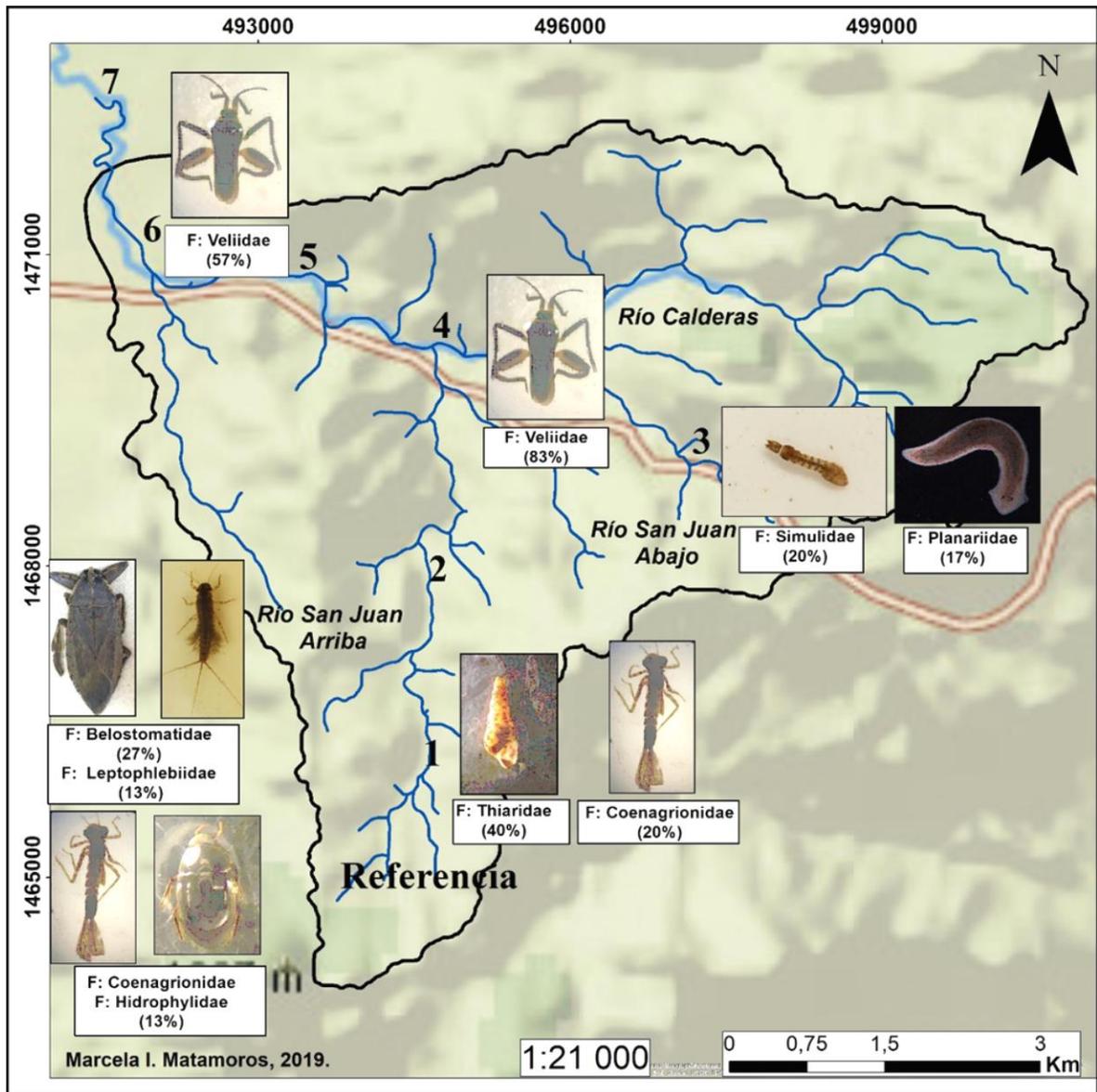
Categorías Taxonómicas						
Phylum	Sub Phylum	Clase	Orden	Familias	Género	
Platyhelminthes	 1	Turbellaria	Tricladida	1) Planariidae	<i>Dugesia sp</i>	
Arthropoda	 1	Malacostraca	Decapoda	1) Pseudothelphusidae	<i>No identificado</i>	
	Crustacea		Insecta	Ephemeroptera	1) Leptophlebiidae	<i>Thraulodes sp</i> <i>Farrodes sp</i> <i>Choroterpes sp</i>
	 1	 2			2) Leptohyphidae	<i>Tricorythodes sp</i>
	 3	 4			3) Caenidae	<i>Caenis sp</i>
					4) Baetidae	<i>Callibaetis sp</i> <i>Cloeodes sp</i>
	 1	 2	 3	Odonata	1) Libellulidae	<i>Macrothemis sp.</i>
					2) Gomphidae	<i>Phylogomphoides sp</i>
					3) Coenagrionidae	<i>Argia sp</i>
	 1	 2	 3	Hemiptera	1) Veliidae	<i>Microvelia sp</i> <i>Rhagovelia sp</i>
					2) Belostomatidae	<i>Belostoma sp</i> <i>Lethocerus sp</i>
	 4	 5			3) Naucoridae	<i>Pelocoris sp</i>
					4) Notonectidae	<i>Notonecta sp</i>
					5) Gerridae	<i>Metrobates sp</i> <i>Trepobates sp</i>
	 1	 2	 3	Coleoptera	1) Elmidae	<i>Heterelmis sp</i>
					2) Hydrophilidae	<i>Tropisternus sp</i> <i>Berosus sp</i>
	 4	 5			3) Dytiscidae	<i>Hydrovatus sp</i> <i>Thermonectus sp</i> <i>Cibister sp</i> <i>Laccophilus sp</i>
					4) Curculionidae	<i>Steremnius sp</i>
					5) Scirtidae	<i>Scirtes sp</i>
	 1		Trichoptera	1) Helicopsychidae	<i>Helicopsyche sp</i>	
 1	 2		Diptera	1) Simuliidae	<i>Simulium sp</i>	
				2) Chironomidae	<i>Chironomus sp</i> <i>Orthocladius sp</i>	
Mollusca	 1	 2	Gastropoda	1) Physidae	<i>Physa sp</i>	
				2) Thiaridae	<i>Melanoides tuberculata</i>	

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.



Mapa 7. Abundancia numérica de macroinvertebrados acuáticos en abril del 2018, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Cholulteca.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.



Mapa 8. Abundancia numérica de macroinvertebrados acuáticos en mayo del 2018, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca.

4.4.2 Índices de diversidad

La presencia de metales, aún en concentraciones bajas, puede afectar la diversidad biológica y por lo tanto la salud ecológica. La respuesta de los macroinvertebrados a este tipo de contaminación se refleja en la composición de la comunidad, abundancia total, riqueza de especies. Aunque la concentración de metales no sea alta, sus efectos se reflejarán en los cambios de la composición de la comunidad como en la abundancia total, y riqueza y en una disminución de la diversidad de especies, la cual está asociada a un aumento en la concentración de metales (Xu et al., 2010).

En general el comportamiento de los índices de Simpson y Shannon en ambos muestreos muestran la misma información, pero con escalas diferentes (gráfico 5). En el sitio de referencia el índice de Shannon en abril fue de 0,76 y en mayo tuvo un incremento a 2,06 representando una mayor homogeneidad ecológica, independientemente que el número de organismos presentes (9) fuese menor respecto a abril (64) (anexo 3.a). Esto se asocia a la mejora en los valores de las variables fisicoquímicas, por ejemplo, el oxígeno y temperatura, que son factores limitantes que sustentan la vida de estos bioindicadores.

En el sitio 2, no hay diversidad ni dominancia, ya que en este sitio no hubo presencia de organismos en los sustratos muestreados. lo anterior se asocia a la alta contaminación por mercurio en las aguas y sedimentos, así como a las altas concentraciones de sólidos (SST y SDT). Contrario a estas observaciones, en los sitios menos contaminados con mercurio, se encontró mayor riqueza y diversidad de especies.

En el sitio 4, fue observada la menor riqueza de todos los sitios en ambos muestreos, ya que solo hubo presencia de un organismo de la Familia Veliidae, correspondiente al Género *Rhagovelia sp.*, es por ello que, el valor de diversidad y dominancia es nulo, indicando que en abril no hay diversidad. En mayo las condiciones fisicoquímicas cambiaron, y hubo mayor presencia de *Rhagovelia* y por única vez en los sitios muestreados un organismo de la Familia Curculionidae (*Steremnius sp.*).

Los Mia tienen estructuras para sostenerse en canto rodado u hojarasca, desarrollando mecanismos de adaptación para vivir en diferentes microhábitats. En los sitios muestreados se observó que en mayo, probablemente debido al aumento del caudal, la velocidad del agua los arrastró. Se ve reflejado en una baja en los índices de diversidad principalmente en los sitios 5 y 6 que representan la cuenca media y baja, ligado a disminución en la riqueza taxonómica, y cambios en la composición comunitaria (gráfico 5).

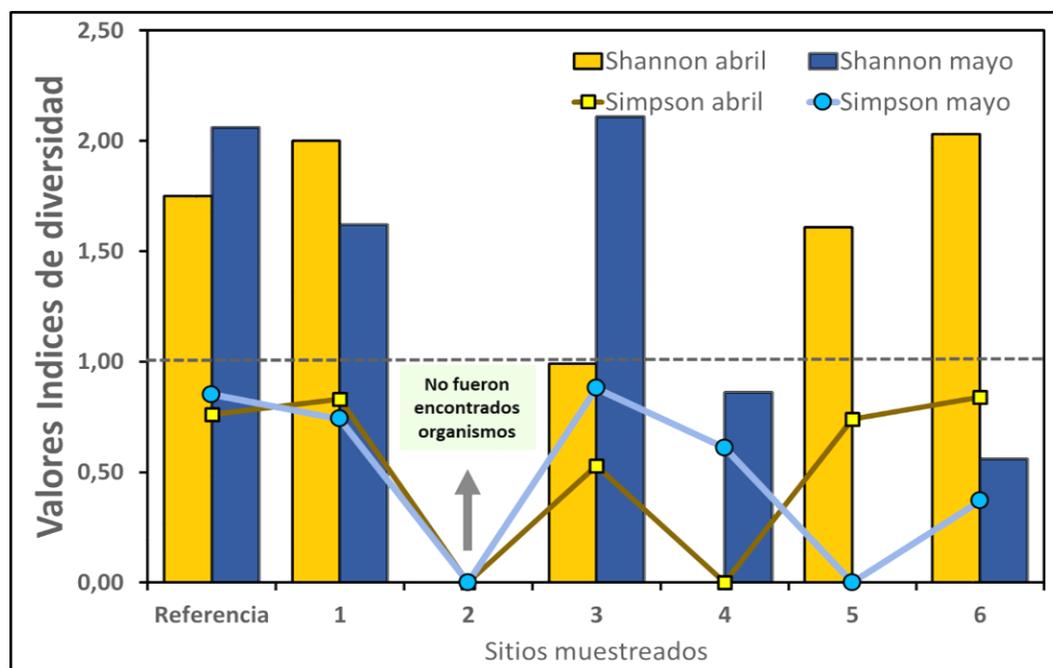


Gráfico 5. Índices de diversidad analizados en los macroinvertebrados acuáticos en abril y mayo, microcuenca del río Calderas, El Corpus Cholulteca 2018.

4.4.3 Índice Biótico a nivel de Familias

La calidad ecológica del agua fue determinada a través del índice biótico a nivel de familias de macroinvertebrados acuáticos adaptado para ser aplicado en la medición de la calidad de las aguas de los ríos de El Salvador (IBF-SV-2010).

Este índice establece la calidad del agua relacionada al aporte de materia orgánica y a la respuesta ecológica de las familias encontradas de Mia, las familias poco tolerantes a la contaminación tienen registros con los valores más bajos.

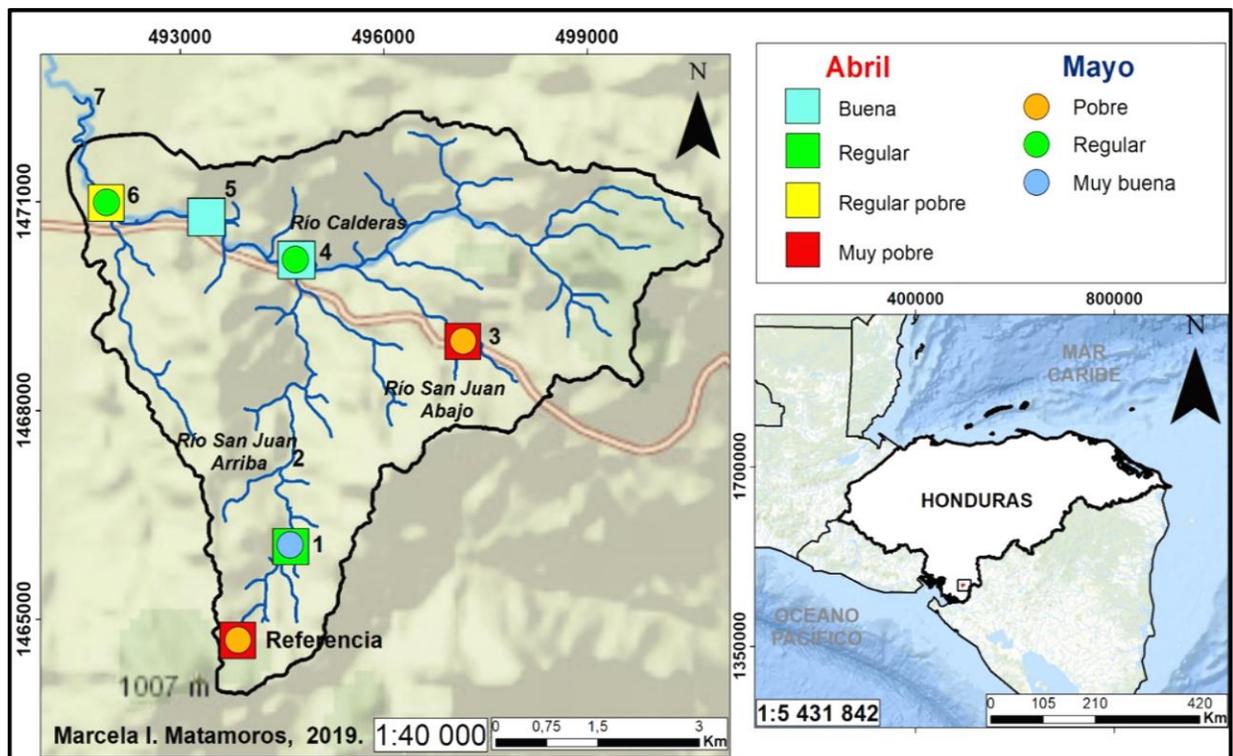
Los resultados de la calidad del agua en la microcuenca del río Calderas se presentan en los anexos 3.b y 3.c. Estos reflejan que en el primer muestreo (abril 2018), los valores y la calidad del agua del sitio de referencia y 3, son las peores, con una categoría de calidad de aguas muy pobre ya que se encontraron organismos tolerantes a contaminación orgánica debido a las actividades antropogénicas circundantes como ser depósito de aguas residuales de origen doméstico. Los resultados en el sitio de referencia son coincidentes con los reportados por estudios previos (IHCIT, 2017). Los sitios con aguas con una calidad buena fueron el 4 y 5.

En el segundo muestreo (mayo 2018), los valores y la calidad del agua en el sitio de referencia y el sitio 3, mejora en una escala, pasando de la séptima a la sexta categoría, que representa una calidad de agua regular pobre con contaminación sustancial. Las aguas del sitio 4 no mejora su calidad, ya que pasa de una calidad buena a una regular. La diferencia de la calidad del agua en ambos muestreos se muestra en el mapa 9.

En general, los ríos estudiados están desprovistos de ictiofauna y con pocos representantes de macroinvertebrados acuáticos debido a las elevadas concentraciones de sólidos en suspensión y disueltos, mercurio y en algunos casos, temperaturas altas asociadas con bajas concentraciones de oxígeno disuelto en el agua (anexo 1a y 1b).

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

De acuerdo a los índices de biodiversidad, la comunidad de macroinvertebrados acuáticos observadas en abril tiene una mayor biodiversidad respecto a los resultados de mayo, sin embargo, la dominancia de estos organismos es menor respecto a mayo y la calidad del agua corresponde con la peor categoría. Este escenario está relacionado directamente a las actividades humanas circundantes y específicamente mineras que actúan como estresores ambientales ejerciendo presión sobre la biota. La inexistencia de organismos en la parte media del río San Juan Arriba en ambos muestreos, obedece a la estrecha asociación con el arrastre de desechos mineros (arenilla principalmente) y mercurio, debido a su incorporación como material alóctono, que forma parte de la zona riparia. En el caso del muestreo de mayo 2018, el cambio de caudal fue una variable que permitió la modificación y variación de los organismos encontrados en categorías taxonómicas y en la abundancia numérica (anexo 3a y 3b).



Mapa 9. Calidad del agua en abril y mayo con base en el IBF-SV, 2010. Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.

4.5 Relación isotópica entre las lluvias y el agua superficial

4.5.1 Régimen de precipitación en abril, mayo y junio 2018

En total, la precipitación en los meses de abril, mayo y junio fue de 961,2 mm, presentando diariamente una alta variabilidad. En abril, únicamente llovió los días 27 y 28, con valores de 40,0 y 38,0 mm/día, respectivamente, representando un 7% de agua nueva (del evento) en el proceso de escorrentía, aún dominado por la recesión del caudal base. En mayo, llovió 16 días, siendo la mínima lluvia de 7,0 mm (entre el 30 y 31) y la máxima, y de la temporada analizada, el 18 de mayo con 100,0 mm (anexo 4.a, 4.b y 4.c).

El porcentaje de agua nueva en el proceso de escorrentía entre el 10 y el 18 de mayo incrementa considerablemente desde un 8% hasta un 80%, coincidiendo con los días de mayor cantidad de lluvia. En el mes de junio, llovió durante 14 días, presentándose la lluvia máxima el 13 de junio con 54,0 mm y la mínima el 20 de junio con 2,6 mm, lo cual representó entre un 62% a 82% de porcentaje de agua nueva en el proceso de escorrentía (gráfico 6 a y b).

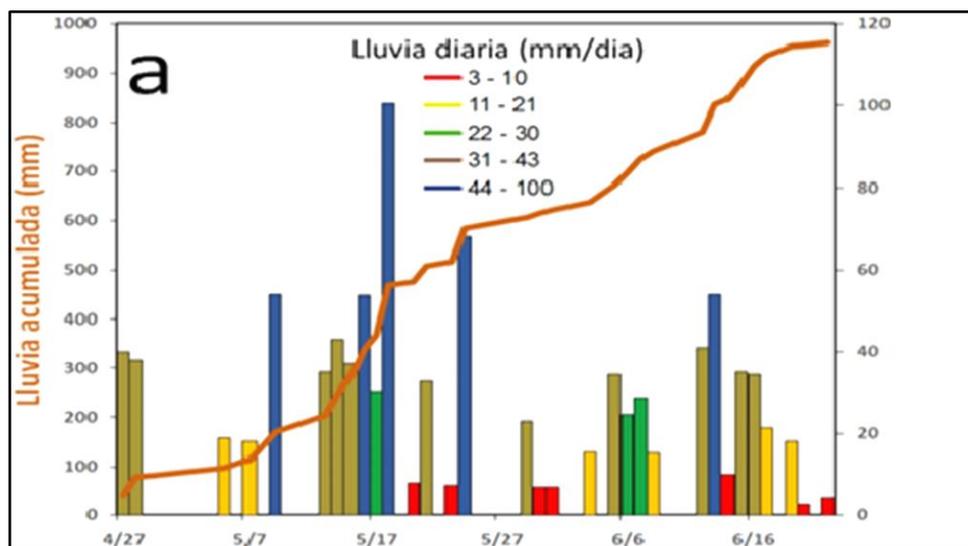


Gráfico 6. a) Lluvia diaria (mm/día) y acumulada (mm), El Corpus, Choluteca 2018.

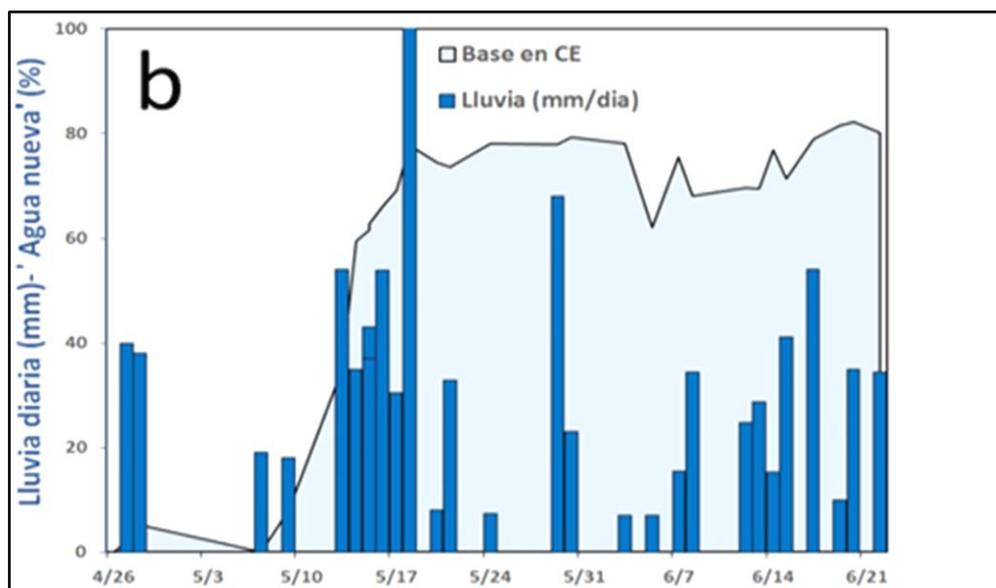


Gráfico 6. b) Lluvia diaria (mm/día) y % de agua nueva en El Corpus, Choluteca 2018.

4.5.2 Trayectorias de masas de aire en relación con la lluvia y variaciones de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y exceso de deuterio

En abril las masas de aire se originaron en el océano pacífico, no obstante, en mayo las masas de aire presentaron un comportamiento variable, careciendo de un patrón específico, tanto en cantidad de lluvia (mm/día), como en su origen. En los días 5, 7 y 9 de mayo, el origen de las lluvias corresponde al norte de Honduras, mientras que entre el 20 y 21 de mayo procedieron del norte y oeste de Nicaragua.

El origen de las masas de aire en junio coincide en un 86% con el origen en el caribe nicaragüense, desplazándose cada evento más al sur progresivamente, como parte del movimiento de la Zona de Convergencia Intertropical (mapa 10 a).

Respecto a las composiciones de $\delta^{18}\text{O}$, se relacionaron con la estacionalidad y el origen de las masas de aire. Los eventos más enriquecidos se presentaron en las primeras tres lluvias de mayo (5, 7 y 9), pudiendo ser los más enriquecidos debido a un fraccionamiento cinético relacionado a la orografía y elevaciones en

su recorrido por Honduras. A mediados y finales de mayo, las composiciones de $\delta^{18}\text{O}$ oscilaron entre -12.67% y, la máxima -0.85%, con un promedio de -5.46%.

Las composiciones de $\delta^{18}\text{O}$ en junio, fueron intermedias/altas, estando relacionadas con el origen de las masas de aire, ya que las trayectorias fueron de mayor longitud respecto a abril y mayo. En su mayoría se originaron en el caribe nicaragüense, descendiendo por Ocotal y Somoto hasta culminar en Choluteca (Honduras). Dado que hay una relación existente entre el descenso de $\delta^{18}\text{O}$ y la cantidad de lluvia (Moerman et al., 2013), en ese sentido, la composición de $\delta^{18}\text{O}$ osciló entre -11.94% (relacionado a los días de menor cantidad de lluvia) y la máxima de -2.55%, con un promedio de -5.97% (mapa 10 b).

Las lluvias más convectivas correspondientes al mes de mayo, mostraron valores altos de exceso de deuterio, debido a las condiciones en las cuales se originó la lluvia, en este caso por evaporación en el golfo de Fonseca y el Océano Pacífico y los primeros tres eventos de lluvia en mayo, relacionados a evidentes efectos de destilación orográfica a través del territorio hondureño. El exceso de deuterio osciló entre +5,08 y +19,79, con un promedio de +14,31. En junio, la composición osciló entre -3,17 y -4,30, con un promedio de -0,32. (mapa 10 c).

La señal isotópica en el caudal base osciló en -5,00 y -5,66 en $\delta^{18}\text{O}$ entre el 20 y 26 de abril, al predominar el caudal base al final del periodo de estiaje, la composición en el río es aún dominado por la señal del acuífero. Los primeros tres eventos de lluvia en mayo (5, 7 y 9), fueron los más enriquecidos en toda la temporada, con valores de -1,08, -0,85 y -1,46 en $\delta^{18}\text{O}$, por lo que potencialmente el agua del río correspondía al agua almacenada en el acuífero.

En cuanto a los resultados del exceso de deuterio en la lluvia, el 86% de las composiciones en abril y mayo, los datos presentaron valores superiores a 10. Araguás, (1992). Menciona que las aguas que han experimentado evaporación tienen valores del exceso de deuterio más bajos de 10.

Según Bedmar, Araguás, Aviléa y Peña (2001). El promedio global de exceso de deuterio ~ 10 ‰, dicho promedio global es usado frecuentemente como

índice de evaporación del agua, donde las aguas que han experimentado evaporación tienen valores del exceso de deuterio más bajos de 10.

En ese sentido, todas las composiciones de junio presentan composiciones con valores inferiores a 10, oscilando entre -3,17 a 4,30, indicando con ello que la lluvia de junio experimentó evaporación, por lo que eventualmente hubo cambios térmicos experimentados en la atmósfera. Los bajos valores de junio, también se asocian a la poca cantidad de lluvia y las altas temperaturas en la zona, ya que, en ese mes la temperatura fue de 27,0°C a 33,0 °C (gráfico 7 a).

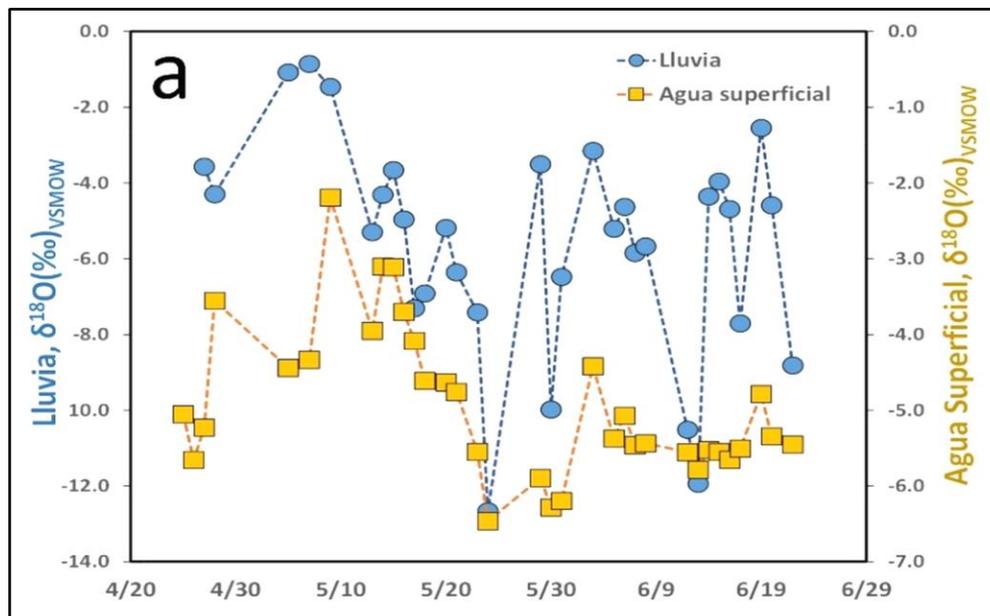


Gráfico 7. a) Composición isotópica de $\delta^{18}O$ en lluvia y agua superficial

Respecto a las composiciones de exceso de deuterio en el agua superficial, según la (gráfico 7 b) su comportamiento es inverso al de la lluvia, con composiciones más bajas en mayo y más altas en junio. Los valores más bajos, relacionados al caudal base fueron en abril, con oscilando entre -0,42 a 5,51. En mayo, oscilaron entre 6,80 a 15,16 y en junio 5,87 a 11,79.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

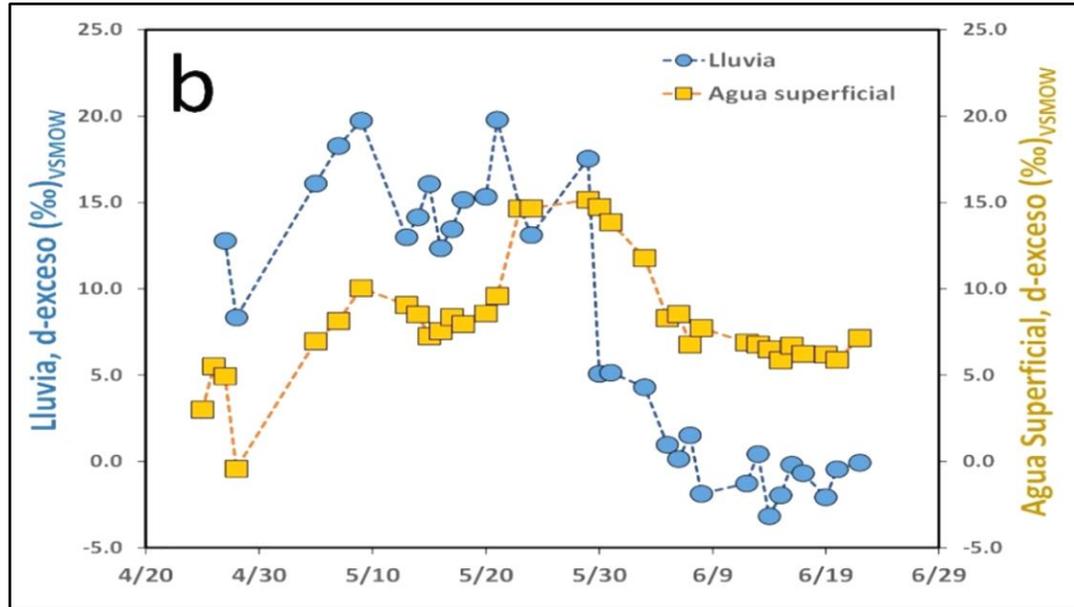
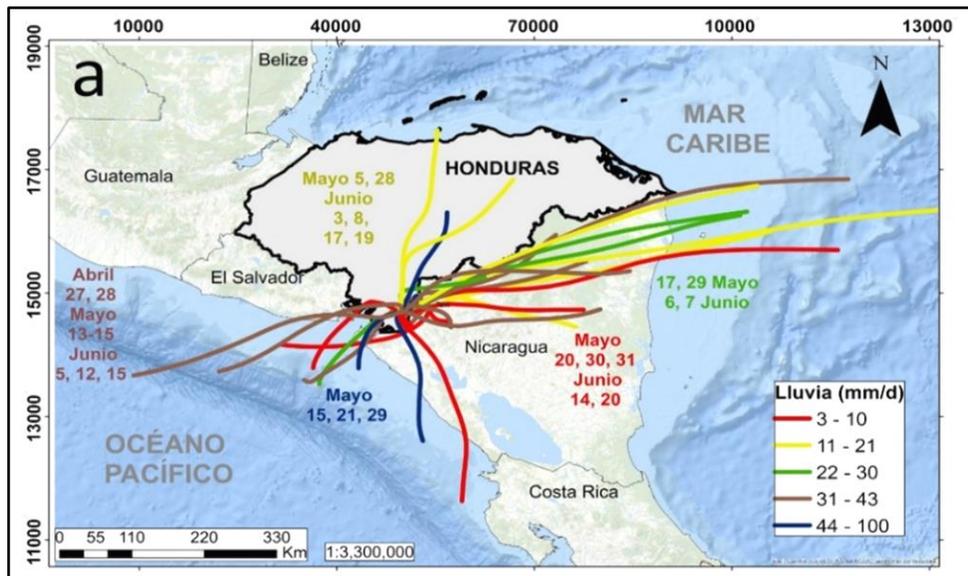
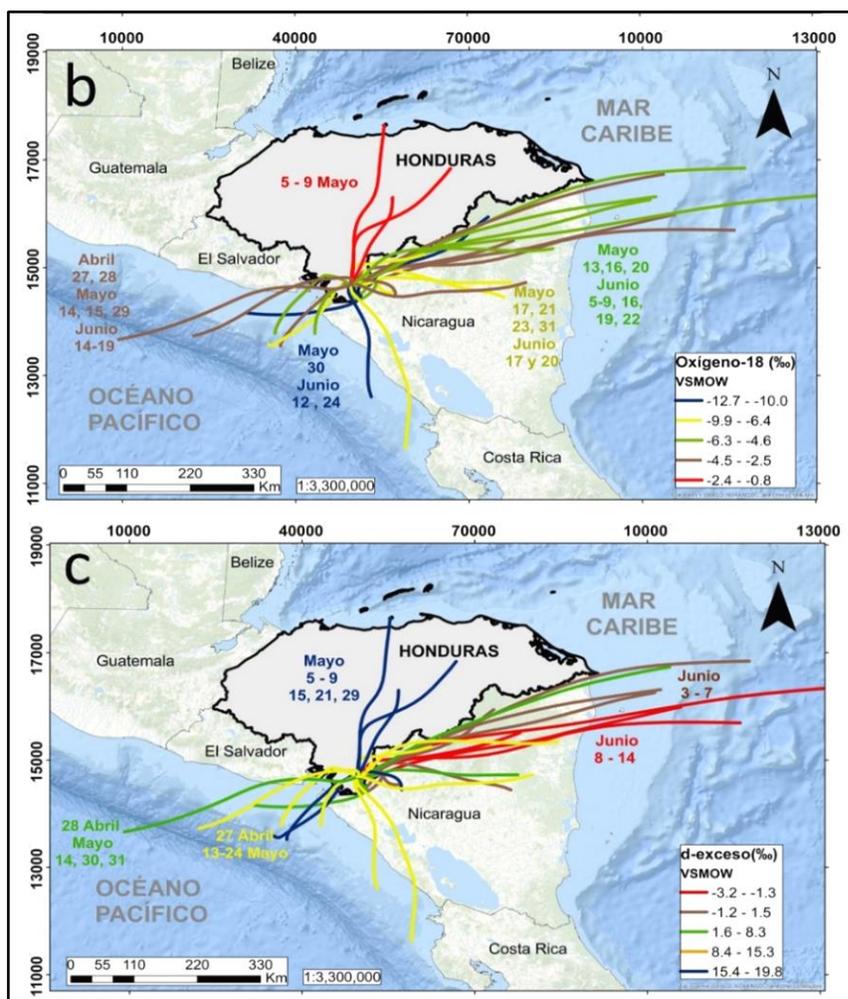


Gráfico 7. b) d-exceso en lluvia y agua superficial, El Corpus, Choluteca 2018.



Mapa 10. a) Lluvia en mm/día en los meses de abril, mayo y junio.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.



Mapa 11. b) Composiciones de $\delta^{18}\text{O}$ y trayectorias de masas de aire en los meses de abril, mayo y junio. c) Composiciones D-exceso y trayectorias de masas de aire en abril, mayo y junio.

4.5.3 Línea meteórica local del agua (LMWL)

La relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en la lluvia y el agua superficial recolectadas en El Corpus ($n=32$ y $n=34$) es lineal (gráfico 8) y comparable con la GMWL (Craig, 1961). La composición de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, osciló en la lluvia desde $-0,85$ y $-12,67$ ‰ y en el agua superficial $-2,19$ y $-6,46$ ‰ respectivamente. Los datos de isótopos estables en la lluvia en los meses de abril, mayo y junio se describen como LMWL: $\delta^2\text{H}=8,70 \cdot \delta^{18}\text{O} + 11,56$; $r^2 = 0,91$ ($n=32$), con una lluvia acumulada de 961,0 mm. En cambio, del agua

superficial de abril, mayo y junio se describe como LMWL: $\delta^2\text{H}=7,08 \cdot \delta^{18}\text{O} + 3,72$; $r^2 = 0,84$ (n=34).

La respuesta isotópica del agua superficial y la lluvia en los eventos de menor precipitación que fueron principalmente en junio, sugiere la existencia de evaporación secundaria y poca infiltración. La importancia del análisis isotópico radica en que se demuestra que el acuífero se recarga principalmente con las lluvias a mediados de mayo, sin embargo, habiendo después del 15 de mayo saturación de los suelos provocando abundante escorrentía superficial, reflejada en el aumento del caudal. Esta agua podría ser aprovechada en tanques u otras estructuras para asegurar la distribución de agua en los meses que no llueve, pues en el Corpus el agua es distribuida de una a dos veces por semana.

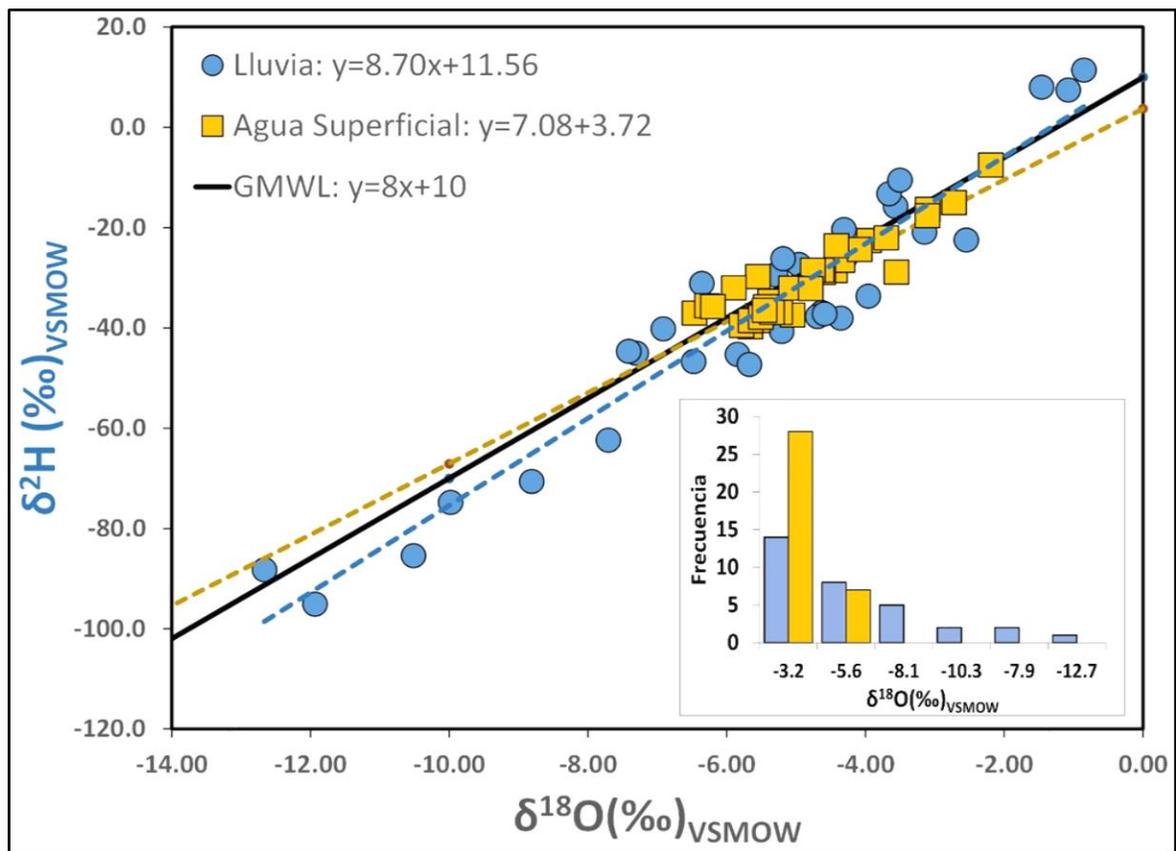


Gráfico 8. Línea meteórica local de El Corpus, Choluteca en los meses de abril, mayo y junio en El Corpus, Choluteca 2018.

4.6 Acciones para promover el manejo adecuado en el uso y control de las emisiones del mercurio

Para disminuir el uso del mercurio, en la actividad minera artesanal de oro a pequeña escala (MAPE), reducir la degradación de la calidad de las aguas, sedimentos y la comunidad de macroinvertebrados acuáticos de la microcuenca del río Calderas, se deben identificar acciones viables y sostenibles que limiten el uso actual del mercurio y reduzcan las emisiones.

Algunas acciones como alternativas para el uso adecuado del mercurio y una gestión integral del agua son:

4.6.1 Optimización de las rastras mineras actualmente en operación

A través de un estudio, determinar la cantidad estequiométrica adecuada de mercurio que se debe usar para la recuperación de oro según la calidad y tipo de broza a procesar. Dicho estudio deberá contemplar las particularidades de cada una de las rastras, molinetes y bateas para conocer la dosificación adecuada dependiendo del método que se use para extraer oro y hacer posible el re uso del mercurio. También, dimensionar la cantidad de cola minera y la calidad de estas en cuanto a la mineralogía, presencia de mercurio y otros metales para posteriormente proponer la disposición adecuada de las mismas. Las colas mineras, se componen de arenilla, material fino particulado y mercurio el cual es liberado y transportado en la microcuenca del río Calderas y zonas aledañas por acción del agua, la pendiente de la cuenca y el viento, provocando efectos negativos en el ambiente.

A su vez se sugiere optimizar el diseño y construcción de las rastras mineras que ya están operando. En primer lugar, que estas posean mayor capacidad de procesamiento de broza, pudiendo aumentar las dimensiones de las rastras y también mejorar el proceso de molienda y torcido, para disminuir la pérdida de mercurio.

En este sentido, y con el propósito que las colas mineras no sean depositadas directamente en el suelo y los ríos, se deberán construir pilas de sedimentación impermeables para las rastras que no las tengan, y en el caso de algunas rastras que actualmente las poseen, ponerlas en funcionamiento y darles el mantenimiento adecuado para su funcionamiento eficiente.

Además, en las áreas donde los desechos mineros se encuentran esparcidos es conveniente recubrirlas con geo membranas para evitar el contacto del agua de lluvia, la infiltración y consecuentemente evitar la erosión.

4.6.2 Canal colector de agua y cosecha de agua

Un canal colector de agua deberá ser colocado en la cuenca alta, preferiblemente más arriba de la toma de agua de “El trapiche”. El propósito de esta estructura es que el agua de escorrentía debe en lo posible, desviarse antes de que penetre el área donde están esparcidas las colas mineras, para evitar que se contamine y evitar la probable infiltración de agua contaminada. Posteriormente, que el agua recolectada sea dirigida a tanques para abastecimiento de agua potable para proveer a las comunidades.

4.6.3 Sensibilización, capacitación y programas de educación ambiental

Con el apoyo de la Alcaldía de El Corpus, desarrollar programas de educación ambiental enfocados en el tema de mercurio, la calidad de las aguas y en la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), de El Corpus, apoyados en los entes ambientales gubernamentales del país, relacionados en la temática, como MiAmbiente a través de CESCOO e INHGEOMIN, además, considerar obtener apoyo por parte de la Academia a través de la escuela de Biología y de la carrera de trabajo social de la UNAH.

El programa de educación ambiental debe tener como objetivo ayudar a que la población en general y las autoridades del municipio de El Corpus adquieran a corto plazo conocimientos y comprensión básica sobre el cuidado del medio ambiente, los efectos de la contaminación principalmente el mercurio y

temas básicos de calidad del agua para garantizar el aprovechamiento de sus recursos de manera sostenible para el desarrollo de sus comunidades.

El programa debe brindarlas herramientas científicas, para que los pobladores de diferentes edades y géneros de las comunidades logren aprovechar el sistema en un ambiente libre de mercurio, sin contaminación de los recursos hídricos, sedimentos y suelos.

Los temas propuestos a abordar son los siguientes:

- Sistemas que sustentan la vida.
- Funcionamiento de los ecosistemas enfocado a cuencas hidrográficas o Unidades Hidrográficas.
- Calidad del agua.
- Mercurio, medio ambiente y toxicología.
- Macroinvertebrados acuáticos y su importancia en el biomonitoreo en la calidad del agua.
- Conservación de la cuenca.
- Mitigación de la contaminación.
- El rol de la comunidad en la educación ambiental.
- Formación de educadores ambientales.

Al mismo tiempo, como producto del programa de educación ambiental, se podría crear y facilitar a los pobladores una caja de herramientas (Toolbox) digital e impresa que comprenda guías con información actualizada y de acuerdo a su realidad, sobre el manejo y riesgo de uso del mercurio, efectos del mercurio en el cuerpo humano y en el medio ambiente. En el caso de temas relacionados a la GIRH, se podrá trabajar con la base de datos gratuita de la Global Water Partnership (GWP).

Estos temas se podrán desarrollar mediante talleres participativos, recreaciones ambientales, elaboración participativa de propuestas de mejora. Como producto del programa, y siguiendo la metodología de Eloísa Trellez Solís,

2006 del manual guía para comunidades de Chile, se podrán realizar a corto plazo comités juveniles ambientales y a mediano plazo observatorios ciudadanos de la cuenca usando parámetros fisicoquímicos de campo y macroinvertebrados acuáticos.

Para llevar a cabo estas recomendaciones es necesario que las autoridades de INHGEOMIN, MiAmbiente, ICF, Ministerio de Salud y la academia conozcan el contexto y los estudios realizados en la zona para poder apoyarlos y regularlos y que sean tomadas en cuenta las recomendaciones relacionadas a mejorar el manejo del recurso hídrico y el mercurio. Es necesario incorporar planes de educación ambiental y mejores prácticas en primera instancia con sus métodos artesanales y posteriormente apoyarse con el proyecto mercurio para cambiar a tecnologías amigables con el ambiente y que ofrezcan seguridad ocupacional a los mineros.

Nuevas tecnologías en la zona servirán de ejemplo para que los mineros pongan en desuso las practicas artesanales en las que usan mercurio. Una ventaja, es que en el municipio de El Corpus la gente tiene buena capacidad de organización, que es de aprovechar para generar cambios de la comunidad en general.

V. CONCLUSIONES

Las emisiones (~683 kg/año) de mercurio en el municipio de El Corpus son permanentes y difusas y se concentran principalmente en la parte alta de la microcuenca del río Calderas, a escasos metros de los ríos. Estas emisiones están acompañadas con la deposición directa de los desechos sólidos, enriquecidos con mercurio, a la red de drenaje de los ríos San Juan Arriba y Calderas, produciendo alteraciones en la calidad fisicoquímica de estos ecosistemas.

Los niveles de contaminación ambiental en la microcuenca del río Calderas se ven reflejados en las concentraciones anómalas de mercurio presentes en las aguas de los ríos, las cuales son hasta 6 órdenes de magnitud superiores a los valores guías para la descarga de aguas residuales (0,01 mg/l) y para el consumo humano (0,001 mg/l).

En la fase sedimentaria, la contaminación ha alcanzado niveles alarmantes, tal que la concentración mínima (261 955,00 $\mu\text{g}/\text{kg}$) es de 6 órdenes de magnitud superior a los valores guías internacionales para la protección de la vida acuática.

La prevalencia de la alta contaminación en el lecho de los ríos está relacionada con la inexistencia de ictiofauna y con la poca y en algunos sitios la inexistencia de macroinvertebrados acuáticos, los cuales a su vez indicaron contaminación orgánica de las aguas en la parte alta de la microcuenca.

El estudio isotópico de las aguas indicó que las lluvias de mayo fueron principalmente convectivas y las de julio estratiformes. El caudal base es controlado por el aporte del acuífero, limitando de esta forma la atenuación de la contaminación.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Los resultados de esta investigación sugieren que las acciones para disminuir el uso del mercurio y promover el cuidado ambiental deben ser: i) implementar a corto plazo un programa de educación ambiental, ii) acompañamiento técnico en la optimización del proceso de las rastras con el objetivo de disminuir el uso del mercurio y evitar la emisión ambiental del mismo y iii) presentar a mediano plazo a la MAPE, alternativas limpias que no impliquen el uso del mercurio en el proceso de recuperación del oro.

VI. RECOMENDACIONES

1. Que la alcaldía, en conjunto a INHGEOMIN, proyecto mercurio y la academia, diseñen e implementen un plan de capacitación con temas relacionados al mercurio, seguridad laboral, medio ambiente, Gestión integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) incluyendo macroinvertebrados acuáticos, dirigido a las autoridades municipales, junta de agua, personal minero y líderes comunales con el fin de comenzar un empoderamiento a los actores locales en la gestión integrada de cuencas y a futuro, elaborar un plan de GIRH.
2. Debido a las concentraciones de mercurio encontradas, es necesario que la alcaldía de El Corpus en conjunto a la secretaria MI ambiente a través del CESCCO y con apoyo de la academia, monitoreen la calidad de las aguas y sedimentos de los ríos, ya que de continuar la MAPE, los niveles de contaminación y sus efectos irán en ascenso.
3. Que la alcaldía inspeccione, supervise y regule a través de la UMA las rastras mineras, sancionando si es necesario a aquellos que no acaten las disposiciones para detener y disminuir la contaminación orgánica y por mercurio principalmente en la comunidad de San Juan Arriba.
4. Que el INHGEOMIN y la alcaldía de El Corpus valoren como una oportunidad la propuesta del proyecto Mercurio para que se instale y se use la planta procesadora de oro ya que esto permitirá una mayor recuperación del oro, el desuso del mercurio y consecuentemente la disminución de la contaminación por mercurio. Dicha acción permitiría la recuperación de la calidad de aguas y sedimentos.
5. A corto plazo, realizar un estudio detallado sobre la especiación del mercurio en agua de lluvia, superficial y subterránea, sedimentos y macroinvertebrados acuáticos para un mejor entendimiento de la contaminación.

6. Se recomienda a la secretaría de educación y MiAmbiente insertar temas de educación ambiental en la educación formal del país, ya que actualmente los estándares educativos nacionales de ciencias naturales no lo contemplan.
7. Divulgar a corto plazo los resultados y recomendaciones de este estudio, a través de seminarios, a las autoridades municipales, el proyecto Mercurio, la dirección del CESCO, ministerio de salud y actores principales de la microcuenca del río Calderas.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Alba-Tercedor, J. (1996). Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. *IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA)*. Instituto Tecnológico Geo-Minero de España, Madrid: 2, 203–213.
- Araguás, L., Louvat, D., López, A., Castillo, E. (1992). Estudios de hidrología isotópica de los acuíferos de Managua. Informe final del proyecto NIC/8/004. Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena. 47
- Arrunátegui, K. (2016). *Utilización de macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad de agua y algunos parámetros físico químicos del río Cascas, La Libertad, marzo–agosto, 2015* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú.
- Aznar, A. (2011). Determinación de los parámetros fisicoquímicos en el agua. Instituto Tecnológico de Química y Materiales “Álvaro Alonso Barba”. Universidad Carlos III. Madrid.
- Bedmar, A., Araguás, L., García, J., y Peña, R. (2001). Relación entre el lago de Managua (Nicaragua) y las aguas subterráneas de su entorno. (C. d. Publicas, Ed.). Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena. *Bio*, 21 (121), 77-82.
- Callisto, M. y F. Esteves. (1996). Composição granulométrica do sedimento de um lago amazônico impactado por rejeito de bauxita e um lago natural. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 8, 115-126.
- Cano, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Revista del Instituto Nacional de Salud BIOMEDICA*, 32(3), Recuperado de: <http://www.revistabiomedica.org/index.php/biomedic/article/view/1437>

- CEQG. (2016). Canadian environmental quality guidelines. Recuperado de: https://www.CEQG.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/
- Cogua, P., Campos, N., y Duque, G. (2012). Concentración de Mercurio Total y Metilmercurio en Sedimento y Sestos de la Bahía de Cartagena, Caribe Colombiano.
- Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CAPRE). (1994). Norma de Calidad del Agua para Consumo Humano. Norma Regional CAPRE. Primera Edición. San José, Costa Rica. 27
- Corbitt, D., Jacob, J., Holmes, C., Streets, D., & Sunderland, E. (2011). Global Source Receptor Relationships for Mercury Deposition Under Present-Day and 2050 Emissions Scenarios. *Environmental Science and Technology*, 45, 10477–10484.
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Custodio, E., y Llamas, M. (1976). *Hidrología Subterránea* (Primera edición). EDICIONES OMEGA, S.A. Barcelona, España:
- DEFOMIN. (2012). Estudio de la Actividad Minera de la Microcuenca Quebrada San Juan Arriba en el Municipio de, El Corpus, Departamento de Choluteca. Tegucigalpa.
- DeOyuela, L. (2003). Esplendor y Miseria en Honduras. Tegucigalpa, Honduras: Editorial Guaymurás.
- Domingo y Giorgio (2013). No todo lo que brilla es oro. Informe sobre minería en los departamentos de Choluteca y Valle, Honduras. Recuperado de: https://pbihonduras.org/fileadmin/user_files/projects/honduras/Honduras_Informes_otras_ONGs/131001__CICA__informe_mineria_SUR_2013.pdf

- Domínguez, E., y Fernández, H. (2009). *Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos: Sistemática y Biología*. Tucumán, Argentina. 1 edición: fundación Miguel Lillo. ISBN 978-950-668-015-2
- Driscoll, D., Mason, R., Man, H., Jacob, D., & Pirrone, N. (2013). Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Environmental Science & Technology*. Recuperado de <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es305071v>
- Durán-Quesada, A. M., Gimeno, L., & Amador, J. (2017). Role of moisture transport of Central American precipitation. *Earth System Dynamics*, 8, 147-161. Obtenido de www.earth-syst-dynam.net/8/147/2017/
- Figueruelo, J., y Marino, M. (2001). *Química Física del Medio Ambiente*. México. Editorial Reverté. S.A.
- Galvão, L., y Corey, G. (1987). Mercurio. Metepec, México.
- Gamboa, M., Reyes, R., y Arrivillaga, J. (2008). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de la salud ambiental. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 68 (2), 13.
- Germer, D y Cálix, E. (2017). Estudio de Línea de base de Mercurio incluyendo información socio-económica en el Municipio de El Corpus, Departamento de Choluteca, Honduras. Proyecto GAR de Mercurio PNUD, CESCO, MIAMBIENTE. Tegucigalpa, Honduras.
- Ghetti, P., & Bonazzi, G. (1981). 1 Macroinvertebrati nella sorveglianza ecologica dei corsi d'acqua. Collana Progetto Finalizzato «Promozione della Qualita dell'Ambiente», CNRAQ/1/127.
- Gilmour, C., Podar, M., Bullock, A., Graham, A., Brown, S., Somenahally, A., Johs, A., Hurt, R., & Elias, D. Mercury Methylation by Novel Microorganisms from New Environments. *Environmental Science and Technology*. DOI/10.1021/es403075t

- Gutiérrez-Fonseca, P. (2010). Guía ilustrada para el estudio ecológico y taxonómico de los insectos acuáticos del Orden Coleóptera en El Salvador. En: Springer, M., y Sermeño, J. (eds.). Formulación de una guía metodológica estandarizada para determinar la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando insectos acuáticos. Proyecto Universidad de El Salvador (UES) – Organización de los Estados Americanos (OEA). Editorial Universitaria UES, San Salvador, El Salvador. 64.
- Hinton, J. (2003). Clean artisanal mining, a utopian approach. 1(2), 99-115. DOI: 10.1016/S0959-6526(02)00031-8
- IBAL. (2009). Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Microcuenca de las Quebradas Las Panelas y La Balsa. Recuperado de http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/cuenca_panelas/DIAGNOSTICO/2.2ASPECTOS_BIOFISICOS.pdf
- Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT). (2017). Levantamiento y Evaluación del catastro del recurso hídrico en microcuencas del río Sampile. Tegucigalpa.
- INHGEOMIN, I. H. (2015). “Estudio Socio económico El Corpus, Choluteca”. Tegucigalpa.
- Instituto de Conservación Forestal (ICF), I. d. (2015). Plan de manejo sub-sistema de áreas naturales protegidas de la zona sur de Honduras (SAPZSURH). En Á. P. Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal. Choluteca, Honduras.
- Johnson, N., Lamb, P., Saul, M., & Winter-Nelson, E. (1997). Meaning of environmental terms. *Journal of Environmental quality*. 26, 581-589
Recuperadode: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm#ixz z5j3RFAI1y>.

- Kocman, D., Kanduc, T., Ogrinc, N., & Horvat N., (2010). Distribution and partitioning of mercury in river catchment impacted by former mercury mining activity.
- Ladrera, R. (2012). Los Macroinvertebrados acuáticos como indicadores del estado ecológico de los ríos. Páginas de Información Ambiental. Barcelona. España.
- Lenntech. (2019). Características fisicoquímicas del mercurio. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm#ixzz5j3JN2mQS>
- Machado, L. (1979). Fundamentos del Ciclo Hidrológico. Caracas, Venezuela. 38
- Margalef, (2014). *Limnología*. Ediciones Omega, S.A, 1983. ISBN 978-84-282-0714-0 España.
- Market, B. (2007). Definitions and principles for bioindication and biomonitoring of trace metals in the environment. Trace Elem. in Med. And
- Merrit, R. & Cummins, K., (1984). *An introduction to the aquatic insects of North America*. Second Edition. Kundall / Hunt Publishing Company, Iowa USA.
- Moerman, J., Cobb, K., Adkins, J., Sodeman, H., & Clark, B. (2013). Diurnal to interannual rainfall $\delta^{18}\text{O}$ variations in northern Borneo driven by regional hydrology. 108–119.
- Molina, C. Gibon, F. Sánchez, Y. Achá, D. Benefice, E. & Guimares, J. (2010). Implicancia ambiental del mercurio en ecosistemas acuáticos de la Amazonia: Situación en Bolivia. *REDESMA*, 4(2), 17.
- Moreno, M. (2008). *Desarrollo de métodos analíticos para especiación de mercurio y su aplicación a la comarca de Almadén. (Tesis doctoral)* Universidad de Castilla, España.
- Newman, M. & McIntosh A. (1991). *Metal Ecotoxicology: Concepts and Applications*. Lewis publishers. Michigan, USA

- Niane B., Moritz, R., Guédron, S., Ngom, M., Pfeifer, R., Mall, I., & Poté, J. (2014). Effect of recent artisanal small-scale gold mining on the contamination of surface river sediment: Case of Gambia River, Kedougou region, southeastern Senegal. *J. Geochem. Explor.* 144 (Part C), 517-527. DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.03.028
- Obrist, D., Kirk, J., Zhang, L., Sunderland, E., Jiskra, M., & Selin, N. (2018). A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use. Springer. DOI 10.1007/s13280-017-1004-9
- OIEA/GNIP. (2014). Guía para el muestreo de la precipitación. 2 (02).
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. TERCERA EDICIÓN, 1. ISBN 92 4 154696 4
- Oyarzun, R., Higuera, P., y Lilo, J. (2011). Minería Ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación. Medellín, España: Consultado en GEMM-Aula2.net Fecha de consulta: 13-09-2019
- Parks, J., Sutton, J., & Lutz, A. (1886). Effects of point and diffuse source loadings on mercury concentrations in the Wabigoon River: Evidence of seasonally varying sediment-water partition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43, 1426-1444. DOI: 10.1139/f86-176
- Peluso, L. (2011). *Evaluación de efectos biológicos y biodisponibilidad de contaminantes en sedimentos del Río de Plata y afluentes (Tesis doctoral)*. Centro de Investigaciones del Medio Ambiente, CIMA, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata.
- Pennak, R. (1978). *Freshwater invertebrates of the United States*. Estados Unidos, 2da edición. ISBN 0-471-0449-8.
- PNUMA, (2002). Evaluación Mundial sobre el Mercurio. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

- Peralta Vital, J. L., Gil Castillo, R., Dapeña Dapeña, C., Valdez González, L., Olivera Acosta, J., y Morejón Miranda, Y. (2015). Hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico. *Ingeniería Hídrica y Ambiente*, 36 (1), 57-72. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S16803382015000100005&lng=es&tlng=es.
- Picado, F. & Bengtson, G. (2012). Temporal and spatial distribution of waterborne mercury in a gold miner's river. *Environmental monitoring*, 14(10), 2746-54.
- Picado, F., Mendoza, A., Cuadra, S., Barmen, G., Jakobsson, K., & Bengtsson, G. (2010). Ecological, Groundwater, and Human Health Risk Assessment in a Mining Region of Nicaragua. *Risk Analysis*, 30 (6), 916-933.
- Picado, F. (2004). Mercury in the environment and the gold mining activity in the St Domingo District, Chontales- Nicaragua. Department of Ecology Chemical Ecology and Ecotoxicology, Lund University, Sweden. Introductory paper (157), 50.
- Poch, M. (2003). *Las Calidades del Agua*. Editorial Rubes. Barcelona, España. ISBN: 84-47-0075-2.
- Poder Ejecutivo. (2014). Decreto Ejecutivo Número PCM 036-2014. La Gaceta. Poder Ejecutivo. (marzo de 2016). Decreto Ejecutivo Número PCM 018-2016. La Gaceta.
- Pott, B & Håkansson, T. (1999). Bioremediation of Creosote- Contaminated Soil on a Laboratory Scale. Tesis de licenciatura. Suecia.
- Prat, N., Rios-Touma, B., Acosta, R., y Rieradevall, M. (2009). Los macroinvertebrados como indicadores de calidad de las aguas. En Fernández, H & E Domínguez (eds.), *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos Sistemática y Bbiología*. Tucumán: Fund. Miguel Lillo.

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), (2008). El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala. Ginebra p. 12.
- Qu, X. Wu, N. Tang, T. Cai, Q. & Park, Y. (2010). Effects of heavy metals on benthic macroinvertebrate communities in high mountain streams. *Limnology journal* (46), 291-302. doi: 10.1051/limn/2010027.
- Rivera, R. (2004). Estructura y composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en ríos de páramo y zonas boscosas, en los andes venezolanos: Tesis, Universidad de los Andes, Mérida.
- Roldán, G. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia*. Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Centro de Investigación (CIEN). ISBN 958-9129-04-8.
- Roldán, G. (1999). Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. En: *Revista de la Académica Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Septiembre, 23 (88), 375-387.
- Roldán, G. (2003). La bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Editorial Universidad del Antioquia. Colombia.
- Roldán, G., Ramirez, J. (ED). (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. Colombia.
- Rolin, R. A. (1988). The Effects of Heavy Metal Pollution of the Upper Arkansas Rivero in the Distribution of Aquatic Macroinvertebrates. *Hydrobiology*, 160, 3-8.
- Ruiz, M. (2017). Levantamiento y Evaluación del Catastro del Recurso Hídrico en Microcuencas del río Sampile. “Programa de Gobernanza Hídrica”, COSUDE.

- Sánchez-Murillo, R., & Birkel, C. (2016). Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *Geophysical Research Letters*, (43). doi:10.1002/2016GL068888.
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Welsh, K., Brooks, E. S., Boll, J., Alfaro-Solís, R., & Valdés- González, J. (2013). Spatial and temporal variation of stable isotopes in precipitation across Costa Rica: an analysis of historic GNIP records. *Open Journal of Modern Hydrology*, 3 (4). doi:10.4236/ojmh.2013.34027.
- Schroeder, W. H., & Muthe, J. (1998). Atmospheric mercury - An overview. *Atmos. Environ.* 32, 809-822.
- Shang, L., Feng, X., Yan, H., Qui, G., & Li, G. (1988). Methylmercury and Total Mercury Distribution in the sediments of Baihua Reservoir, Guizhou Province, China.
- Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), (1989). Acuerdo de Criterios Ecológicos de Calidad de Agua CE- CCA-001/89. Publicado en el Diario Oficial de la Federación del 2 de diciembre de 1989. Tomo CD, No. 9. México, D.F. Silva G.S., Muñoz O.A., De la Isla de Bauer M.L. e
- Sermeño, J. et al., (2010). Determinación de la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando invertebrados acuáticos: índice biológico a nivel de familias de invertebrados acuáticos en El Salvador (IBF-SV-2010). *En: Formulación de una guía metodológica estandarizada para determinar la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando insectos acuáticos. Proyecto Universidad de El Salvador (UES) - Organización de los Estados Americanos (OEA). Editorial Universitaria UES, San Salvador, El Salvador. pp. 43.*
- Sierra, C. (Ed). (2011). Calidad del agua, evaluación y diagnóstico. Universidad de Medellin, Colombia: Editorial universitaria.

- Springer, M. (2006). Clave taxonómica para larvas de las familias del orden Trichoptera (Insecta) de Costa Rica. *Revista de Biología Trópica*, 54. 273-286.
- Springer, M. (2010). Biomonitorio Acuático. En Springer, M., A. Ramírez, & P. Hanson. (2010). Macroinvertebrados de Agua Dulce de Costa Rica I. *Revista de Biología Tropical*, 1 (4) 240.
- Springer, M., A. Ramírez, & P, Hanson. (2010). Macroinvertebrados de Agua Dulce de Costa Rica I. *Revista de Biología Tropical*, 1 (4) 240.
- Stein, A., Draxler, R., Rolph, G., Stunder, B., Cohen, H., & Ngan, F. (2015). NOAA'S HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling sistem. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96 (12), 2059-2078.
- Tarradellas, J. (1996). In Kreeith, F. (1994). Handbook of a solid waste management. Ed. Mcgraw-Hill. 15-20.
- Valverde, N., Caicedo, O., y Aguirre, N. (2009). Análisis de calidad de agua de la quebrada La Ayurá con base en variables fisicoquímicas y macroinvertebrados acuáticos. 4 (1). Universidad de Antioquia. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/277246992>.
- Vásquez, C. (2008). Especiación de mercurio en el medio ambiente. (5). ISSN-e 1885-2475.
- Villa, I. (2003). Caracterización de ecosistemas acuáticos, Interacciones sedimento agua En: Fernández C. A. El agua en Iberoamérica Aportes para la integración entre los organismos de 169 gestión y los centros de investigación. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Colombia, 17-23.
- Villareal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., & Umaña, A.M. (2004). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de diversidad. Programa de inventarios de

- Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia. 236.
- WHO. (1989). Environmental Health Criteria 86 Mercury- Environmental Aspect. Finlandia. ISBN: 92-4-154286-1.
- Wood, J.MN., Kennedy, F.S., Rosen, C.G., (1968). Sunthesis of methil-mercury compounds by extracts of a methanogenic bacterium. *Nature*, 220 (5163):173-174.
- Xu, H., Xie, S.-P., Wang, Y., & Small, R. J. (2005). Effects of Central American Mountains on the Eastern Pacific Winter ITCZ and Moisture Transport. *Jornal of Climate*, (18), 3856-3873. Recuperado de <https://doi.org/10.1175/JCLI3497.1>.
- Yarto, M. Gavilán, A. y Castro, J. (2004). La Contaminación por Mercurio en México. *Gaceta ecológica*, 72.
- Zhang, H. (2006). Photochemical redox reactions of mercury. *Struct. Bond.* (120), 37-79. doi: 10.1007/430_015
- Zúñiga, M. (2009). Bioindicadores de Calidad de Agua y Caudal Ambiental. Capítulo 7. Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente- IREHISA. Cali, Colombia.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Variables fisicoquímicas en agua superficial

Tabla 1.a. Variables fisicoquímicas en agua superficial, medidas en campo en abril. El Corpus, Choluteca 2018.

Sitios	Q (m³/s)	pH			ORP			CE (µS.cm ⁻¹)			T (°C)			Turbidez (UNT)			OD (mg/l)			%O ₂	SST (mg/l)	SDT (mg/l)	Hg-t agua (mg/l)
		1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}				
Ref.	0,001	6,61	6,91	6,76	-11	-18	-14	192	193	193	28,9	27,1	27,9	4,84	4,91	5	2,8	2,9	2,8	37,00	23,22	140,50	0,074
1	0,014	6,83	6,86	6,84	77	83	80	168	165	166	25,2	25,0	25,1	2,80	2,91	2	2,5	2,5	2,5	29	19,10	127,00	0,053
2	0,014	8,20	8,22	8,21	160	158	159	219	219	219	27,4	27,2	27,3	982	982	982	4,6	4,6	4,6	48	10 209,09	16 793,91	4 928,000
3	0,000	7,44	7,43	7,43	109	104	106	428	428	428	29,5	29,1	29,3	34,9	34,9	35	1,9	1,9	1,9	20	28,67	264,00	*mnr
4	0,000	8,41	8,49	8,45	227	222	224	283	283	283	25,8	26,3	26,0	326	337	1 665	3,4	3,4	3,4	35	1 056,00	231,00	0,12
5	0,027	8,35	8,37	8,36	177	176	178	316	317	316	33,4	32,0	32,7	2 550	2 550	2 550	3,5	3,6	3,6	35	640,00	214,00	*mnr
6	0,027	8,72	8,72	8,72	163	159	158	331	332	332	33,1	32,8	32,9	3 395	3 395	3 395	2,8	2,9	2,3	31,00	13,50	201,00	0,022
7	Este sitio no tenía agua en la temporada seca.																						
CV	1,01			0,10			0,61			0,33			0,11			1,10			0,30	0,25	2,20	2,44	0,476

*Mediciones no realizadas.

“Contaminación por mercurio en los ríos San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Tabla 1.b. Variables fisicoquímicas en agua superficial, medidas en campo en mayo. El Corpus, Choluteca 2018.

Sitios	Q (m³/s)	pH			ORP			CE (µS.cm ⁻¹)			T (°C)			Turbidez (UNT)			OD (mg/l)			%O ₂	SST (mg/l)	SDT (mg/l)	Hg-t agua (mg/l)
		1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}	1	2	\bar{x}				
Ref.	0,013	6,47	6,45	6,46	103	99	101	163	163	163	25,0	25,0	25,0	7,82	7,11	7	3,6	3,6	3,6	43	3,80	109,00	0,084
1	0,037	6,70	6,74	6,72	20	18	19	152	152	152	25,3	25,3	25,3	9,48	9,54	10	3,7	3,8	3,7	44	2,80	128,50	0,225
2	0,242	7,62	7,67	7,65	148	138	143	157	157	157	28,0	27,4	27,7	925	925	925	4,0	4,1	4,1	51	1 029,17	139,00	0,372
3	0,279	7,66	7,71	7,68	-8	-10	-9	139	139	139	25,2	25,1	25,1	19,9	19,6	19	4,1	4,2	4,1	50	3,10	61,50	*mnr
4	1,346	7,78	7,92	7,85	95	92	93,5	116	116	116	26,7	26,2	26,5	271	271	271	4,5	4,6	4,5	57	140,40	109,00	0,09
5	1,630	7,82	7,89	7,85	124	126	125	128	128	128	27,3	27,3	27,3	110	110	110	4,7	4,7	4,7	60	50,67	116,00	*mnr
6	4,264	7,93	7,95	7,94	152	148	150,	129	129	129	30,7	30,7	30,7	186	186	186	4,7	4,7	4,7	63	154,80	107,50	0,090
7	4,886	7,32	7,40	7,36	172	172	172	138	138	138	31,7	31,7	31,7	505	505	505	4,2	4,2	4,2	56	396,00	130,00	*mnr
CV	1,24	0,07	0,08	0,07	0,59	0,60	0,60	0,24	0,24	0,24	0,09	0,09	0,09	1,35	1,35	1,35	0,10	0,10	0,10	0,13	1,70	0,20	0,551

*Mediciones no realizadas.

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Tabla 1.c. Matriz de correlación entre SST, SDT y Hg-t en agua superficial, medidas en campo en abril. El Corpus, Choluteca 2018.

	SST	SDT
SDT	0,9953	1,0000
Hg-t	0,9949	1,0000

Tabla 1.d. Matriz de correlación entre SST, SDT y Hg-t en agua superficial, medidas en campo en mayo. El Corpus, Choluteca 2018.

	SST	SDT
SDT	0,7205	1,0000
Hg-t	0,8026	0,8778

Anexo 2. Granulometría y variables fisicoquímicas de sedimentos superficiales

Tabla 2.a. Granulometría y contenido de materia orgánica (MO) de los sedimentos muestreados en abril y mayo, Microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.

Sitios	Abril (%)				Mayo (%)			
	Arena	Arcilla	Limo	MO	Arena	Arcilla	Limo	MO
Ref.	90,11	4,48	5,4	4,26	90,48	4,24	5,27	*mnr
1	88,60	4,95	6,43	8,41	91,55	4,98	3,46	5,82
2	76,69	5,47	17,83	6,92	89,42	7,86	2,72	2,96
3	86,77	7,11	6,11	11,69	92,01	4,36	3,62	4,60
4	41,61	19,76	38,61	6,30	91,24	5,86	2,9	2,72
5	83,83	13,94	2,21	7,00	81,52	6,25	12,22	2,71
6	59,66	25,92	14,40	6,04	91,29	5,74	2,96	3,51
7	81,10	8,13	10,75	*mnr	74,38	7,61	18,00	3,71

*Mediciones no realizadas.

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Tabla 2.b. Variables fisicoquímicas en sedimento, abril y mayo de 2018.

Sitio	Abril				Mayo			
	pH	ORP	T (°C)	Hg total	pH	ORP	T (°C)	Hg total
Ref	6,93	125	27,6	959,138	6,8	135	28,1	696,915
1	6,8	114	29,1	505,245	6,8	108	28,65	487,751
2	8,81	135	31,05	2 773,199	7,85	117,5	28,9	877,142
3	7,73	82	27,6	261,955	7,6	49,5	26,45	321,475
4	8,12	146	28,65	1 408,768	6,94	133	28,1	346,999
5	7,7	206	31,55	457,039	7,2	146,5	30,65	268,741
6	7,55	-35	33,7	281,645	7,44	151,5	31,75	288,265
7	*mnr	*mnr	*mnr	292,5	6,96	102	31,55	268,355

*Mediciones no realizadas.

Tabla 2.c. Matriz de correlación entre variables fisicoquímicas en sedimento, abril de 2018.

	pH	eH	T	Hg-t	MO	Arena	Arcilla	Limo
pH	1							
eH	0,159	1						
T	0,277	-0,375	1					
Hg-t	0,723	0,321	0,007	1				
MO	0,084	-0,053	-0,265	-0,293	1			
Arena	-0,445	0,23	-0,292	-0,207	0,277	1		
Arcilla	0,167	-0,455	0,63	-0,265	-0,254	-0,794	1	
Limo	0,531	-0,026	-0,002	0,478	-0,23	-0,912	0,4751	1

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Tabla 2.d. Matriz de correlación entre variables fisicoquímicas en sedimento, mayo de 2018.

	<i>pH</i>	<i>ORP</i>	<i>T</i>	<i>Hg-t</i>	<i>MO</i>	<i>Arena</i>	<i>Arcilla</i>	<i>Limo</i>
<i>pH</i>	1							
<i>Eh</i>	-0,2500	1						
<i>T</i>	-0,0583	0,57919	1					
<i>Hg-t</i>	0,2290	0,06094	-0,353	1				
<i>MO</i>	0,1534	-0,5052	0,004	-0,362	1			
<i>Arena</i>	0,1892	-0,0526	-0,629	0,354	0,032	1		
<i>Arcilla</i>	0,3347	0,19989	0,572	0,113	0,06	-0,612	1	
<i>Limo</i>	-0,2937	0,01157	0,573	-0,427	-0,051	-0,982	0,4511	1

Anexo 3. Macroinvertebrados acuáticos

Tabla 3.a. Total de taxa, riqueza e índices de diversidad en abril, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.

Sitios	Abril				Mayo			
	Taxa	Riqueza	Índice Simpson	Índice Shannon	Taxa	Riqueza	Índice Simpson	Índice Shannon
Ref.	11	64	0,76	1,75	9	15	0,85	2,06
1	9	14	0,83	2,00	5	15	0,74	1,49
2	No fueron encontrados organismos				No fueron encontrados organismos			
3	6	48	0,53	0,99	14	41	0,88	2,34
4	1	2	0	0	3	6	0,61	1,00
5	7	28	0,74	1,61	No fueron encontrados organismos			
6	10	38	0,84	2,03	2	4	0,37	0,56
7	No había agua				No fueron encontrados organismos			

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Tabla 3.b. Clasificación de la Calidad del Agua en función del Puntaje Total Obtenido IBF-SV-2010 en abril, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.

Sitios muestreados	Valor IBF-SV-2010	Nivel de Calidad	Interpretación del grado de contaminación orgánica
Referencia	7,38	Muy pobre	Contaminación orgánica severa
1	5,21	Regular	Contaminación orgánica bastante sustancial
2		No fueron encontrados organismos	
3	8,10	Muy pobre	Contaminación orgánica severa
4	5,00	Buena	Alguna contaminación orgánica
5	4,50	Buena	Alguna contaminación orgánica
6	6,13	Regular pobre	Contaminación sustancial

Tabla 3.c Clasificación de la Calidad del Agua en función del Puntaje Total Obtenido IBF-SV-2010 en mayo, microcuenca del río Calderas, El Corpus, Choluteca 2018.

Sitios muestreados	Valor IBF-SV-2010	Nivel de Calidad	Interpretación del grado de contaminación orgánica
Referencia	6,47	Pobre	Contaminación sustancial
1	3,94	Muy buena	Contaminación orgánica leve
2		No fueron encontrados organismos	
3	6,05	Pobre	Contaminación sustancial
4	5,17	Regular	Contaminación orgánica bastante sustancial
5		No fueron encontrados organismos	
6	5,5	Regular	Contaminación orgánica bastante sustancial

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Anexo 4. Datos meteorológicos

Tabla 4.a. Datos meteorológicos de abril 2018.

Fecha	Temp Out	HUM out	Temp in	HUM in	Heat Index	Presión	Tasa de Precipitación	Precipitación Diaria	Velocidad Del Viento	Dirección del Viento
	°C	%	°C	%	°C	hPa	mm/h	mm	Nudo	
18/04/2018	35	67	29	54	35	1012,90	0	0	16	NO
19/04/2018	36	61	31	53	35	1012,9	0	0	21	NO
20/04/2018	36	57	32	48	36	1012,4	0	0	20	N
21/04/2018	35	64	38	52	37	1012	0	0	22	SO
22/04/2018	36	72	39	54	38	1012,3	0	0	14	NO
23/04/2018	36	86	31	63	38	1012,7	0	0	16	SO
24/04/2018	36	88	30	66	37	1013,4	0	0	21	N
25/04/2018	36	83	31	66	38	1014	0	0	17	O
26/04/2018	33	87	29	66	36	1012,7	0	0	17	SO
27/04/2018	33	94	29	76	36	1013,8	117,6	41,2	21	S
28/04/2018	33	89	32	76	36	1013,5	0,2	0,4	26	SE
29/04/2018	36	94	36	71	38	1014,3	0	0	13	NE
30/04/2018	33	91	30	71	36	1013,7	0	0	17	NE

Tabla 4.b. Datos meteorológicos de mayo, 2018

Fecha	Temp Out	HUM out	Temp in	HUM in	Heat Index	Presión	Tasa de Precipitación	Precipitación Diaria	Velocidad Del Viento	Dirección del Viento
	°C	%	°C	%	°C	hPa	mm/h	mm	Nudo	
01/05/2018	34	62	32	56	35	1013,2	0	0	18	N
02/05/2018	35	67	31	59	36	1013,4	0	0	20	E
03/05/2018	26	89	30	65	29	1012,7	0	0	3	E
04/05/2018	35	93	28	69	38	1011,8	11,4	1	16	SO
05/05/2018	32	94	28	69	37	1013,6	38,6	15,8	22	SE
06/05/2018	32	85	33	72	35	1015	2,2	0,8	14	SE
07/05/2018	33	93	29	72	36	1015,3	16	6,6	20	SE
08/05/2018	33	94	28	76	35	1014,7	2,8	1	12	NO
09/05/2018	32	97	28	78	36	1014,7	145,8	59,2	17	SE
10/05/2018	29	96	27	80	33	1014,7	0,2	0,2	9	SO
11/05/2018	32	96	33	79	38	1017,9	17,4	1,6	18	SE
12/05/2018	27	88	32	76	29	1014,4	0	0	6	NO
13/05/2018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/05/2018	31	97	33	71	36	1015	92,2	43,6	20	E
15/05/2018	30	98	36	75	36	1014,1	120	47,4	13	S
16/05/2018	30	98	36	74	37	1015,8	140,4	54,6	18	SE
17/05/2018	29	96	34	71	34	1014,2	86,6	30	14	E
18/05/2018	30	97	35	73	36	1013,6	125,2	84,8	23,5	E
19/05/2018	29	96	33	72	35	1014,3	11	2,8	10,5	E
20/05/2018	30	96	33	72	35	1014,5	126,6	12,8	20	S
21/05/2018	29	97	34	70	33	1012,9	131	20,6	9	NO
22/05/2018	28	96	33	71	1014	34	7,2	7,6	19	E
23/05/2018	28	96	31	75	32	1015,6	67	6,8	17	SE
24/05/2018	30	98	32	78	36	1015,9	164,9	90,2	13	SE
25/05/2018	30	98	33	80	36	1013,8	4,6	1,8	10	SE
26/05/2018	29	97	33	77	34	1012,5	24,4	6,4	22	SE
27/05/2018	27	97	29	76	29	1014,4	12,2	17,2	22	E
28/05/2018	28	93	31	78	33	1014,6	167	18,2	18	SE
29/05/2018	29	93	33	77	34	1015,1	118,8	21	11	SO
30/05/2018	30	97	34	82	36	1013,7	15	6,4	30	SO
31/05/2018	30	97	34	80	36	1013,7	64,4	10,4	28	S

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

Tabla 4.c Datos meteorológicos de junio, 2018

Fecha	Temp Out	HUM out	Temp in	HUM in	Heat Index	Presión	Tasa de Precipitación	Precipitación Diaria	Velocidad Del Viento	Dirección del Viento
	°C	%	°C	%	°C	hPa	mm/h	mm	Nudo	
01/06/2018	32	84	35	78	36	1012,9	0	0	12	E
02/06/2018	32	94	37	69	35	1014,2	0	0	16	SE
03/06/2018	32	95	36	79	38	1016,6	102,8	15,4	19	N
04/06/2018	33	81	36	71	38	1015,7	0	0	21	SE
05/06/2018	31	96	34	74	37	1014,2	192	34,4	20	NE
06/06/2018	29	95	33	78	35	1013,7	137,2	24,8	10	S
07/06/2018	30	94	33	80	36	1014,3	126,6	28,8	19	SE
08/06/2018	27	81	29	71	29	1014,2	0	0	10	S
09/06/2018	32	76	35	72	34	1014,9	0	0	23	NE
10/06/2018	31	97	34	68	34	1015,5	0	0	19	SE
11/06/2018	29	97	33	72	34	1015	44,2	11,2	17	SE
12/06/2018	31	96	35	74	36	1015,4	153,6	41,1	14	O
13/06/2018	31	94	37	75	37	1016,1	240	54	23	NE
14/06/2018	30	97	34	74	36	1017	35,6	10	17	SE
15/06/2018	29	97	35	77	34	1015,4	103	35	17	SE
16/06/2018	29	96	31	78		1015,8	185,8	34,4	14	SE
17/06/2018	29	94	33	78	35	1017,1	111,8	21,8	24	SE
18/06/2018	31	87	34	77	38	1016,2	0	0	17	NE
19/06/2018	31	97	35	75	36	1015,9	151,6	18	20	E
20/06/2018	31	97	34	75	36	1017,4	11,4	2,6	14	SE
21/06/2018	29	96	34	75	36	1017,1	2,2	2,6	12	SE
22/06/2018	30	95	34	76	37	1016,1	46,2	4,2	17	N
23/06/2018	32	89	36	76	37	1015,6	0	0	11	SE
24/06/2018	30	71	32	69	34	1011,4	0	0	6	NE

“Contaminación por mercurio en el río San Juan Arriba y Calderas; acciones para controlar su uso y emisión ambiental en la minería artesanal del oro”.

¡A la Libertad por la Universidad!