



---

---

**Cuenca alta de la quebrada Páez y cuenca baja y media de la quebrada  
La Baja, municipio de California, Páramo de Santurbán, Santander**

**INFORME TÉCNICO DE EVALUACIÓN PRELIMINAR DE CALIDAD DE AGUA  
SUPERFICIAL EN ZONAS DE MINERÍA DE ORO**

Elaborado por

**Corporación Geoambiental TERRAE**

Juan Diego Escobar Mejía, Ingeniero Mecatrónico,  
Estudiante de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo U.N.

**Con el apoyo de:**

Julio Fierro Morales, Geólogo MSc. Geotecnia U.N.  
Ana María Llorente Valbuena, Ing. Ambiental MSc. Geomática U.N.  
Erika Cuida López, Geóloga U.N.

Diciembre de 2018

## TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido .....	2
Lista de figuras .....	3
Lista de tablas.....	4
Lista de fotografías .....	5
1. Resumen .....	6
2. Introducción .....	6
3. Marco teórico .....	8
3.1 Geología de la región y contexto geoquímico del yacimiento .....	8
3.2 Drenajes ácidos de mina (DAM) y liberación de elementos tóxicos: .....	9
3.3 Elementos tóxicos usados en el proceso minero .....	11
3.3.1 Cianuro: .....	12
3.3.2 Mercurio: .....	12
3.4 El caso particular del uranio .....	13
4. Metodología .....	14
4.1 Determinación de parámetros a analizar .....	14
4.2 Selección de puntos de muestreo.....	16
4.3 Recolección y almacenamiento de muestras de agua y sedimentos .....	19
5. Discusión de resultados .....	20
5.1 Resultados e interpretación de parámetros <i>in situ</i> .....	20
5.1.1 Potencial de hidrógeno (pH) .....	21
5.1.2 Conductividad eléctrica .....	22
5.1.3 Potencial de óxido reducción (ORP).....	24
5.1.4 Comparación de resultados con datos de referencia .....	24
5.2 Resultados e interpretación de análisis de laboratorio .....	25
5.2.1 Especiación química .....	27
5.2.2 Uranio en aguas .....	30
5.2.3 Metales detectados por extracción química secuencial (BCR).....	32
5.2.4 Análisis de concentración de metales .....	39
5.2.5 Sulfatos.....	40
5.2.6 Nitratos .....	41
6. Conclusiones .....	42
7. Recomendaciones.....	43

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Eh (potencial redox) y pH de las especies acuosas de arsénico en un sistema As-O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O a 25 °C y 1 bar de presión total .....	11
Figura 2 Estaciones de muestreo .....	17
Figura 3 pH medido en campo por Terrae.....	21
Figura 4 Mapa con valores de conductividad .....	23
Figura 5. Conductividad a lo largo del recorrido. Los valores en el recuadro verde son aguas arriba de actividades mineras y los del amarillo, aguas abajo, cada vez con puntos con vertimientos mineros. ....	23
Figura 6 ORP a lo largo del recorrido .....	24
Figura 7. Resultados de especiación química de arsénico en agua.....	28
Figura 8. Resultados de especiación química de arsénico en sedimento .....	29
Figura 9. Resultados de especiación química de mercurio en agua .....	29
Figura 10. Resultados de especiación química de mercurio en sedimento.....	30
Figura 11. Resultados de presencia de uranio medido en agua.....	31
Figura 12 Diagrama Eh-pH del uranio en medios acuosos.....	32
Figura 13 Resultados extracción secuencial (BCR) de zinc .....	34
Figura 14. Resultados de extracción secuencial (BCR) para zinc en sedimentos .....	35
Figura 15 Resultados extracción secuencial de plomo .....	35
Figura 16. Resultados de extracción secuencial (BCR) para plomo en sedimentos.....	36
Figura 17 Resultados extracción secuencial de cadmio .....	37
Figura 18. Resultados de extracción secuencial (BCR) para cadmio en sedimentos.....	37
Figura 19 Resultados extracción secuencial de manganeso .....	38
Figura 20. Resultados de extracción secuencial (BCR) para manganeso en sedimentos.....	39
Figura 21. Resultados de presencia de cobre y manganeso en agua.....	40
Figura 22. Resultados de presencia de sulfatos medidos en agua .....	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resultados de mineralogía QEMSCAN.....	9
Tabla 2 valores de referencia de metales pesados y metaloides típicos de DAM. ....	10
Tabla 3 Parámetros a analizar .....	14
Tabla 4 instrumentos utilizados en toma de datos in situ.....	15
Tabla 5 Criterios de calidad admisibles para la destinación de agua para diferentes usos nacionales e internacionales .....	15
Tabla 6 Estaciones de campo.....	17
Tabla 7 Requerimientos de envase, preservación y almacenamiento ambiente de muestras .....	20
Tabla 8 Resultados de parámetros <i>in situ</i> tomados en la fase de campo .....	20
Tabla 9 Comparación de datos <i>in situ</i> de Terrae e información de referencia .....	25
Tabla 10 Especiación química de arsénico y mercurio en agua Fuente: Elaboración propia. ....	26
Tabla 11. Especiación química de arsénico y mercurio en sedimentos Fuente: Elaboración propia .....	26
Tabla 12 Presencia de minerales en agua Fuente: Elaboración propia. ....	26
Tabla 13 Extracción secuencial en sedimentos Fuente: Elaboración propia. ....	26



---

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 Colorímetro midiendo la concentración de cobre en una muestra .....	19
Fotografía 2. Purga de envases realizada para la recolección de muestras de agua.....	19

## 1. RESUMEN

Este informe busca aportar información independiente y calificada de la calidad del agua superficial relacionada a la actividad minera de oro en la cuenca alta de la quebrada Páez y cuenca baja y media de la quebrada La Baja, en el municipio de California, Santander, así como contrastar con la información disponible de las empresas Minesa, Eco Oro y el Servicio Geológico Colombiano con el objetivo de evaluar los impactos que la minería de oro ha tenido sobre la calidad del agua superficial y prever posibles afectaciones de cara a los proyectos megamineros que vienen avanzando en la región, logrando relacionar la geología propia de la región y los yacimientos con minerales y metales pesados presentes en el agua superficial y la actividad minera de oro en sus diferentes fases y formas.

Se realizaron pruebas *in situ* y de laboratorio para detectar concentraciones y especies de elementos en muestras de aguas superficiales y sedimentos comparando sitios “limpios” sin actividades productivas humanas (o con intervenciones de muy bajo impacto) y sitios afectados por actividad minera, que incluyeron un drenaje minero.

Los resultados del estudio evidencian la presencia de sulfatos, cobre, manganeso, uranio, arsénico y mercurio en cantidades superiores a los límites establecidos por normas nacionales e internacionales evidenciando una relación espacial entre la actividad minera y las afectaciones a la calidad de agua superficial.

## 2. INTRODUCCIÓN

Colombia tiene el 49% de los páramos del mundo, estos son ecosistemas megadiversos que proveen el 70% del agua consumida en el territorio nacional<sup>1</sup>

*“Los páramos son ecosistemas de gran riqueza ecológica y, a su vez, juegan un importante papel en la economía de sociedades andinas por su valor agrícola e hídrico. Su importancia ecológica, genética y científica se basa en sus paisajes únicos y flora endémica, [...]. Cumplen una importante función social y económica para algunas comunidades dedicadas a la actividad agrícola en estas zonas, y son fundamentales en la regulación natural regional, gracias a que su vegetación y las características de sus suelos retienen el agua controlando la escorrentía superficial reduciendo picos y protegiendo de la erosión a las zonas bajas” (Díaz Granados et al, 2005)<sup>2</sup>.*

En Colombia existen 36 complejos de páramos, ellos comprenden el 1,74% del territorio nacional (2 millones de hectáreas), y a pesar de que el país avanza en su protección, hay una actividad que amenaza su conservación: la minería. Según la Defensoría del Pueblo a 2011 se encuentran otorgados 391 títulos mineros en áreas de páramo (108.972 ha)<sup>3</sup>, principalmente proyectos de extracción de oro y carbón, amenazando su función ecológica.

<sup>1</sup> Instituto Alexander von Humboldt. (2012). *El Gran Libro de los Páramos de Colombia*. Bogotá: IAVH.

<sup>2</sup> Díaz-Granados, Mario A., Navarrete González, Juan D., Suárez López, Tatiana. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. Bogotá: Revista de Ingeniería, Facultad de ingeniería, Universidad de los Andes.

<sup>3</sup> Defensoría del Pueblo de Colombia. (2010). *La minería de hecho en Colombia*. Bogotá.

El páramo de Santurbán está ubicado en los departamentos de Santander y Norte de Santander (en jurisdicción de 30 municipios), abarca aproximadamente 140.000 ha y es la principal fuente de agua y recursos para la región. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (en adelante IDEAM) define este complejo como “estrella fluvial” donde se origina el agua para más de 2.200.000 habitantes de 26 municipios de Santander y Norte de Santander, entre ellos: Cúcuta, Ocaña, Pamplona, California, Suratá, Vetas, Bucaramanga, Girón, Floridablanca, Piedecuesta<sup>4</sup>.

Las principales amenazas a este ecosistema son producto de la colonización del páramo: tala y crecimiento de zonas agropecuarias y ganaderas, altamente dependientes de la unidad familiar, y la minería: con explotaciones tradicionales y grandes proyectos mineros de oro y minerales asociados de empresas transnacionales.

La tensión existente por la presencia de diferentes actores en páramos, las actividades productivas que realizan y los efectos que estas producen en estos ecosistemas estratégicos impulsaron en la Ley 1450 del 2011, donde se ordenaba la *identificación y la delimitación* de los mismos para garantizar su cuidado y preservación. Cumpliendo con esa ley en el 2014 se expidió la delimitación del páramo de Santurbán (Resolución 2090 del 2014), pero en 2018, la Corte Constitucional dejó sin piso la demarcación establecida en el 2014 por considerar que ésta se efectuó sin tener en cuenta a la población que habita en la alta montaña (Sentencia T-361). El plazo para la nueva delimitación venció el 16 de noviembre del 2018.

Dos proyectos de megaminería han intervenido el Páramo de Santurbán, más específicamente en el municipio de California, Santander. El primero de ellos es el Proyecto Angosturas de la compañía canadiense Eco Oro Minerals Corp. (antes Greystar) el cual consta de 8 títulos mineros para un área total de 30.000 ha. En septiembre del 2012 la Agencia Nacional de Minería lo declara de Interés Nacional a pesar de los reparos hechos por la sociedad, la academia y grupos de interés. No obstante lo anterior, el proyecto se ve afectado en el 2014 por la Resolución 2090 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que decidía demarcar el páramo de Santurbán y la sentencia C-035 del 8 de febrero del 2016 expedida por la Corte Constitucional en la que extiende la prohibición de desarrollo de actividades extractivas a los páramos del país.

El segundo proyecto denominado Soto Norte, está a cargo de la compañía de capital árabe Sociedad Minera de Santander (Minesa) propiedad del fondo Mubadala. Este proyecto busca la extracción de 9 millones de onzas de oro durante 25 años<sup>5</sup>. Luego de varios años tramitando la Licencia Ambiental, la empresa Minesa decide retirar la solicitud, buscando así evadir la norma que impediría volver a solicitarla a futuro por no haber cumplido los requerimientos. Mientras prepara información para un nuevo proceso, Minesa ya construyó el túnel exploratorio El Gigante, de 6 m de diámetro y 150 m de profundidad, cuyos vertimientos caen a la quebrada La Baja.

California (con menos de 2.000 habitantes) es uno de los 30 municipios que se ubican sobre páramo y el escenario de la disputa entre comunidades y los 2 proyectos mencionados anteriormente. California cuenta con una tradición minera de más de 400 años en la que la

<sup>4</sup> Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga -CDMB-. (2015). *Páramo Santurbán*. Bucaramanga.

<sup>5</sup> <https://www.portafolio.co/economia/la-realidad-sobre-el-proyecto-minero-de-oro-512274>

mayoría de sus habitantes se han dedicado a la minería tradicional, está ubicado en la cuenca del río Vetás y las quebradas La Baja, Angosturas y Páez.

Para el presente trabajo se consultaron informes de prospección geológica, geoquímica y de calidad de agua en los Estudios de Impacto Ambiental de los proyectos Soto Norte (de Minesa), Angosturas (de Eco Oro) y en reportes del Servicio Geológico Colombiano. De allí se obtuvieron características propias del yacimiento, anomalías en las mediciones de pH y conductividad eléctrica y concentraciones de bario, nitratos, sulfuros, cobre, mercurio, arsénico, plomo, cadmio, zinc y uranio, las cuales fueron comparadas con normas o estándares internacionales sugeridos por la EPA, la OMS (2006) y la Unión Europea y con normas nacionales como la Decreto 1594 de 1984 expedido por el Ministerio de Agricultura y la Resolución 2115 de 2007 expedida por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Así se determinó el alcance del muestreo y los análisis a realizar: i) presencia, ii) especiación y iii) extracción secuencial para determinar el comportamiento geoquímico de los metales asociados al yacimiento e identificados en la zona.

Es de especial interés para esta investigación la presencia de uranio en la región por sus posibles afectaciones a la salud humana y ecosistémica, pues si bien este nunca ha sido explotado, existen informes desde la década de los 50 de la presencia de este mineral radioactivo en la zona relacionado espacialmente a los yacimientos auríferos.

### 3. MARCO TEÓRICO

La contaminación de fuentes de agua producto de la actividad antrópica es uno de los problemas más grandes que enfrenta el planeta. Se trata de la acumulación de una o más sustancias ajenas al agua que se van recolectando hasta magnitudes que empiezan a generar problemas en el funcionamiento natural de los ecosistemas. Existen dos clases de contaminación: puntual (descarga puntual de diferentes contaminantes) y difusa (donde no puede determinarse una única fuente).

La minería en sus diferentes etapas y escalas implica procesos que disminuyen la disponibilidad de agua y afectan su calidad. Para detectar estas afectaciones existen múltiples pruebas de campo y laboratorio que dan cuenta de la presencia y concentración de sustancias contaminantes en función del territorio donde se desarrolla la actividad y las técnicas empleadas. A continuación, se presentan las características del contexto geoquímico de la zona y algunas de las amenazas a la calidad del agua territorios donde se desarrolla actividad minera:

#### 3.1 Geología de la región y contexto geoquímico del yacimiento

La región pertenece al antiguo Macizo de Santander (región centro-occidental), compuesto de rocas cristalinas, metamórficas y granitos antiguos, cuyo protolito es sedimentario e ígneo tal vez de edad precámbrica (Champetier G., Álvarez Osejo, J.A., 1961)<sup>6</sup>.

La zona del yacimiento presenta características litológicas correspondientes a rocas metamórficas del Precámbrico y rocas ígneas de composición granítica del Triásico

---

<sup>6</sup> Champetier G., Álvarez Osejo, J.A. (1961). *Informe de la comisión de reconocimiento en la región California-Vetas departamento de Santander*. Informe 1374 Servicio Geológico Nacional

asociadas a diques, cuerpos porfíricos y brechas tectónicas que han sido afectadas por procesos de alteración hidrotermal.

Se reconocen 4 tipos de alteraciones hidrotermales en esta zona: propilítica, filica, argílica avanzada y supérgena compuesta por asociaciones de minerales debido a procesos de oxidación-lixiviación, entre ellos cuarzo hasta el 75,4%, alunita hasta el 16% y muscovita hasta el 10,7% (Minesa, 2017)<sup>7</sup>

Los resultados de mineralogía QUEMSCAN presentados en el Estudio de Impacto Ambiental (en adelante EIA) del proyecto Soto Norte se presentan en la siguiente tabla:

TABLA 1 RESULTADOS DE MINERALOGÍA QEMSCAN  
FUENTE: MODIFICADO DE EIA PROYECTO SOTO NORTE, MINESA (2017)

Muestra	LB204:2 AT0035	LB152:1 AT0085	LB246:1 AT0109 Duplicado
Tipo de roca residual	Neis	Mineral de bajo grado	Anfibolita
Mineral			
Cuarzo [SiO <sub>2</sub> ]	59,5	62,9	0,95
Pirita [FeS <sub>2</sub> ]	6,67	6,06	0,71
Calcopirita [CuFeS <sub>2</sub> ]	0,06	0,12	0,14
Otros CuS	0,04	0,05	0,00
Ortos Sulfuros	0,03	0,02	0,03
Oxido Fe	0,00	0,03	1,21
Otros Óxidos	0,21	0,21	0,38

Se puede evidenciar cómo importantes cantidades de pirita están presentes en todos los tipos de roca residual, la mayor cantidad en rocas neísicas y material de bajo grado con más de 6%.

Además de pirita, en el yacimiento se identificaron otros minerales tales como esfalerita (sulfuro de zinc), tetraedrita argentífera (compuesta por cobre, antimonio y plata), galena (sulfuro de plomo) en bajas proporciones y cuarzo con inclusiones de uraninita (óxido de uranio) (Wolfgang, 1955)<sup>8</sup>. Adicionalmente, a partir del análisis cualitativo en muestras de filón se obtuvieron valores positivos para antimonio, arsénico, bario (en trazas), cadmio, cobre, manganeso, níquel (en trazas), plomo, vanadio y zinc (Bueno, 1955)<sup>9</sup>

### 3.2 Drenajes ácidos de mina (DAM) y liberación de elementos tóxicos:

Son flujos de agua provenientes de zonas de actividad minera (botaderos, presas de relave y tajos mineros) que aparecen como producto de la alteración de las rocas expuestas y las aguas que entran en contacto con ellas y son producto de una serie de reacciones geoquímicas que involucran agua, roca y aire debido a la exposición de grandes volúmenes

<sup>7</sup> Minesa. (2017). *Estudio de Impacto Ambiental proyecto Soto Norte*. Capítulo Geología y geomorfología.

<sup>8</sup> Wolfgang, H. (1955). *Examen petrográfico de las muestras radioactivas procedentes de California, La Baja, Santander*. Informe No. 1142. Instituto Geológico Nacional.

<sup>9</sup> Bueno, J. (1955). *Yacimientos de uranio y otros metales en la región de La Baja, Municipio de California, Departamento de Santander*. Informe No. 1142. Instituto Geológico Nacional.

de desechos rocosos a condiciones atmosféricas que resultan en acidificación. (Fierro, 2012)<sup>10</sup>.

En el caso de la minería de metálicos, las rocas mineralizadas suelen tener grandes concentraciones de sulfuros, particularmente pirita (sulfuro de hierro), el más abundante entre ellos. Debe tenerse en cuenta que la roca mineralizada y no mineralizada que se encontraba en el subsuelo aislada del oxígeno, es decir bajo condiciones reductoras es expuesta al aire en grandes volúmenes, lo cual provoca la oxidación de la pirita y demás sulfuros liberando así sulfatos y ácido sulfúrico donde una parte de pirita genera 1,64 partes de ácido sulfúrico (Terraes, 2016)<sup>11</sup> Esta reacción química es espontánea y altamente exotérmica, además, el calor liberado en la reacción retroalimenta el proceso y favorece aún más la oxidación de la pirita y el inicio de oxidación de otros sulfuros como la calcopirita.

La acidificación y alcalinización del agua lleva a la solubilización de metales pesados y metaloides, pues la estabilidad de ellos responde a cambios de pH y condiciones de oxidación – reducción (redox). Según Eckenfelder (2000)<sup>12</sup>, los metales pesados como el cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni), zinc (Zn) y cromo (Cr) se solubilizan bajo condiciones de pH ácido o alcalino extremo, es decir valores menores a 3 y mayores a 12. Sin embargo, bajo ciertos valores de concentración dentro de este rango de pH estos metales también pueden solubilizarse o precipitar ya sea como sulfuros o como hidróxidos. Estos elementos son nocivos para el ecosistema y la salud humana como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 2 VALORES DE REFERENCIA DE METALES PESADOS Y METALOIDES TÍPICOS DE DAM.  
FUENTE: TERRAE (2016)

ELEMENTO	VALOR DE REFERENCIA	AFECTACIONES A LA SALUD
Cobre	2 mg/l	Efectos gastrointestinales agudos
Cromo	0,05 mg/l (Cr total)	Capacidad cancerígena y genotoxicidad
Arsénico	0,01 mg/l	Cancerígeno
Cadmio	0,03 mg/l	Daño a los riñones
Plomo	0,01 mg/l	Afecta sistema nervioso central y periférico. Acumulable en huesos.
Níquel	0,07 mg/l	Cancerígeno
Zinc	0,03 mg l	Fitotóxico

En cuanto a metaloides, el arsénico es el más destacado por su alta toxicidad y estrecha relación con aguas que drenan zonas mineras, con el agravante de que se puede mantener soluble en ciertas formas químicas en cualquier rango de pH y Eh (potencial de oxidación-reducción) (Gill, 2015)<sup>13</sup>. Se presenta usualmente en 2 estados de oxidación: trivalente [As (III) o arsenito] y pentavalente [As (V) o arsenato]. As (V) aparece como H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub> y sus

<sup>10</sup> Fierro, J. (2012). *Una aproximación sintética sobre impactos ambientales de la minería no legal. En Minería en Colombia. Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos*, Vol 2. Bogotá: Contraloría General de la República

<sup>11</sup> Terraes. (2016). análisis desde la perspectiva de amenazas sociambientales de una mina de oro a cielo abierto: caso de estudio La Colosa, Cajamarca (Tolima).

<sup>12</sup> Eckenfelder, W.W. (2000). *Industrial Water Pollution Control*. McGraw-Hill Series in Pollution, 138, 358-367.

<sup>13</sup>Gill R. (2015). *Chemical fundamentals of Geology and Environmental Geoscience*.

correspondientes productos de disociación ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{AsO}_4^{3-}$ ). As (III) aparece como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  y sus correspondientes productos de disociación ( $\text{H}_4\text{AsO}_3^+$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ,  $\text{HAsO}_3^{2-}$  y  $\text{AsO}_3^{3-}$ ). Aunque tanto As (V) como As (III) son móviles en el medio, es precisamente el As (III) el estado más movilizable en el medio acuoso y el más biotóxico.

El estado de oxidación del arsénico, y por tanto su movilidad, están controlados fundamentalmente por las condiciones de oxidación-reducción (potencial redox Eh) y el pH. De hecho, el arsénico es un elemento singular entre los metaloides pesados y elementos formadores de oxianiones por su sensibilidad a movilizarse en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6,5-8,5) (Lillo, 2008)<sup>14</sup>.

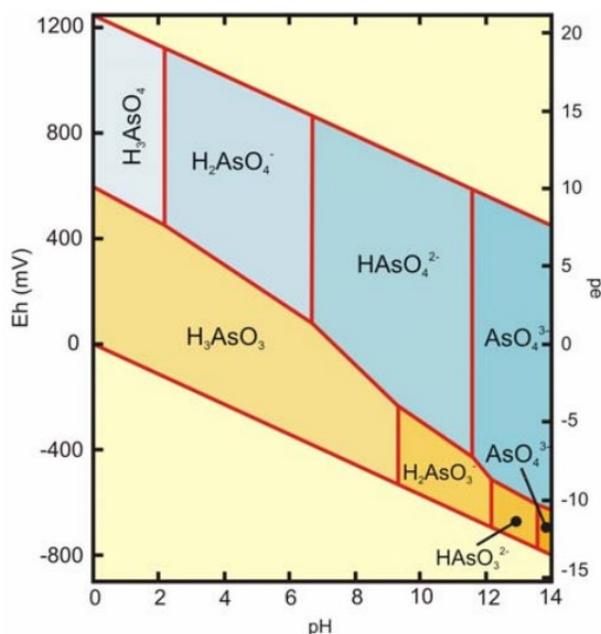


FIGURA 1. EH (POTENCIAL REDOX) Y PH DE LAS ESPECIES ACUOSAS DE ARSÉNICO EN UN SISTEMA AS-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O A 25 °C Y 1 BAR DE PRESIÓN TOTAL  
FUENTE: (SMEDLEY & KINNIBURG, 2002)<sup>15</sup>

La asociación del oro con la pirita es tan frecuente que tanto ésta como su forma combinada con el arsénico (As), la arsenopirita (sulfuro de arsénico), son dos de los marcadores más usados en la prospección y exploración de oro (Berger, Ayuso, Wynn, Seal, 2008)<sup>16</sup>. En el caso del páramo de Santurbán, las concentraciones de pirita están entre 1% y 7% según indica el EIA del proyecto Soto Norte de Minesa.

### 3.3 Elementos tóxicos usados en el proceso minero

Una de las principales fuentes de contaminación del agua en proyectos mineros son los químicos usados para el procesamiento del material rocoso extraído, especialmente los utilizados en el proceso de amalgamamiento del oro, que por ser un metal estable y poco reactivo al oxígeno en aire y agua, requiere agentes acomplejantes y oxidantes para lograr

<sup>14</sup> Lillo, Javier. (2008). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*

<sup>15</sup> Smedley, P. L. and D. G. Kinniburgh. (2002). *A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters.*

<sup>16</sup> Berger, B.R., Ayuso, R.A., Wynn, J.C., Seal, R.R., (2008). *Preliminary model of porphyry copper deposits*

tasas de lixiviación aceptables (Perea, 2016)<sup>17</sup>. Las sustancias más comunes para la amalgamación de oro son:

### 3.3.1 Cianuro:

El cianuro es una sustancia química que puede existir en varias formas, permite disolver, formar complejos estables y estabilizar el oro en las soluciones. Este elemento destaca por su alta toxicidad y gran volumen requerido para el proceso de beneficio.

En seres humanos, la dosis letal es de 1 a 2 mg/kg y cabe anotar que es altamente reactivo a muchos elementos químicos (Lötter. N, 2005)<sup>18</sup>. El Decreto 1076 del 2015 de Presidencia de la República, establece el límite permisible para consumo humano y doméstico en 0,2 mg/L. Una de sus afectaciones a la salud es impedir que el cuerpo pueda aprovechar oxígeno.

Si bien el cianuro no fue objeto de análisis en el presente estudio, es importante mencionarlo ya que es o ha sido usado por la minería de pequeña escala en la región y porque según el EIA del proyecto Angosturas de Eco Oro (antes Greystar) este sería el principal insumo para amalgamar el oro mediante la lixiviación por cianuro, usando 1033 toneladas mensuales de cianuro de sodio en una concentración entre 100 y 500 partes por millón. En cuanto al EIA del proyecto Minesa, no usarían este químico por no optar por refinar los metales de su interés en el país.

### 3.3.2 Mercurio:

El mercurio es el único elemento metálico que es líquido a temperatura ambiente, es altamente tóxico en sus diferentes formas y utilizado usualmente en la minería de oro tradicional para la amalgamación en frío, pues este se adhiere al oro formando una amalgama que facilita su separación de la roca. Si bien el mercurio se encuentra de modo natural en el planeta, la actividad antrópica desde la revolución industrial ha aumentado sus niveles en el medio ambiente.

Las zonas mineras son fuentes de dispersión de mercurio al aire y sistemas acuáticos. Si bien el mercurio inorgánico genera afectaciones a la salud por inhalación y consumo, su forma más tóxica es el metilmercurio. Este es originado principalmente a partir de la metilación del mercurio inorgánico por bacterias aerobias y anaerobias. En general, todas las formas de mercurio que entran en los sistemas acuáticos pueden convertirse en metilmercurio, el cual es bioacumulado por organismos acuáticos y biomagnificado a través de la cadena alimenticia (Olivero Verbel & Johnson<sup>19</sup>, 2002; Español<sup>20</sup>, 2012).

<sup>17</sup> Perea Solano, Carlos Guillermo, (2016). *Evaluación de una metodología alternativa a la cianuración para la disolución de oro utilizando solventes orgánicos*.

<sup>18</sup> Lötter. N. (2005). *Cyanide volatilisation from gold leaching operations and tailing storage facilities*. University of Pretoria.

<sup>19</sup> Olivero Verbel, J. & Johnson, B. (2002). *El lado gris de la minería del oro: La contaminación con mercurio en el norte de Colombia*. Universidad de Cartagena. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Grupo de Química Ambiental y Computacional.

<sup>20</sup> Español, S. (2012). *Contaminación por mercurio por la actividad minera*. Revista Biomédica, Volumen 32, No 3, Instituto Nacional de Salud, Colombia.

El mercurio se utiliza para procesar el mineral, este se adhiere al oro para separar y extraerlo de las rocas en las que se encuentra, se forma una amalgama que posteriormente es evaporada para dejar solo el oro.

### 3.4 El caso particular del uranio

El uranio es un elemento radioactivo presente en la naturaleza como mineral con concentraciones típicas de unas pocas partes por millón. Los efectos nocivos del uranio se deben a la composición química de esta sustancia y no a la radiación y se dan principalmente por la exposición al aire, agua y alimentos.

Frente a las afectaciones a la salud, la OMS dice que la nefritis es el principal efecto químico inducido por el uranio en personas. No hay datos suficientes sobre la capacidad cancerígena del uranio en seres humanos y en animales de experimentación (OMS, 2006)<sup>21</sup>, aunque según el portal de publicaciones médicas del gobierno de Estados Unidos (pubmed.gov) se encuentran cerca de 1000 publicaciones que ligan uranio y cáncer, muchas de ellas relacionadas con minería de uranio. Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades las afectaciones a la salud de deben a sus efectos químicos y no a la radiación.

La presencia de uranio en la zona ha sido documentada desde la década de los 50 del siglo pasado. El “Estudio de radioactividad en el departamento de Santander” realizado por el Ministerio de Minas y Petróleos en el año 1953 y estudios posteriores muestran el potencial uranífero de la región mediante reconocimiento radiométrico en yacimientos metalíferos.

La mineralización del uranio en la región se ha dado por material que rellena la fractura principal y secundaria, y por roca adyacente a estas fracturas que ha sido mineralizada por acción hidrotermal<sup>22</sup> En estas cavidades se puede encontrar cuarzo hidrotermal (también presente por sustitución de roca porfídica) que sirve como asiento de los minerales de uranio como muestran los exámenes petrográficos de Nelson para el Instituto Geológico Nacional<sup>23</sup>. Los estudios revelan la presencia de uranita en infusiones finísimas diseminadas en el cuarzo.

La liberación del uranio se da producto de someter a la intemperie las rocas que lo contienen:

*“los análisis de las muestras de afloramiento comparados con las demás del mismo filón revelan que ha habido sin duda disolución y migración del mineral de uranio [...] en general en toda la zona minera hay condiciones muy favorables para que aguas del subsuelo se acidulen por la alteración de compuestos sulfídricos, [...]. De aquí que la disolución de los compuestos de uranio por acción de estas aguas ácidas es allí un proceso de muy fácil ocurrencia” (Bueno, 1955).*

<sup>21</sup> Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*.

<sup>22</sup> Bueno, J. (1955). *Yacimiento de uranio y otros metales en la región de la baja, municipio de California, departamento de Santander*. Informe No. 1143, Instituto Geológico Nacional.

<sup>23</sup> Nelson, W. (1955). *Examen petrográfico de las muestras radioactivas procedentes de California-La Baja- Santander*. Informe No. 1142, Instituto Geológico Nacional.

## 4. METODOLOGÍA

Para el levantamiento ambiental del componente de calidad del agua se realizó una visita de campo entre el 17 y el 20 de agosto de 2018 (temporada seca<sup>24</sup>) a la zona rural del municipio de California, departamento de Santander. La visita incluyó la medición de datos *in situ* y toma de muestras de agua para su posterior análisis en laboratorio, esto con el fin de obtener información de las condiciones fisicoquímicas de distintos puntos de los cuerpos de agua estudiados. El trabajo de campo se realizó durante un fin de semana festivo, lo que implica que muchas de las minas no estaban en funcionamiento. A continuación, se describen las actividades realizadas.

### 4.1 Determinación de parámetros a analizar.

Se realizó toma de datos *in situ* de diferentes parámetros indicativos de la calidad del agua y recolección de muestras de agua superficial y sedimentos para posterior análisis en laboratorio.

Cuando un cuerpo de agua superficial fluye no solo lleva agua, también transporta todos los materiales que incorpora en su contacto con el medio, el río moviliza un sistema físico, químico y biológico, por eso los análisis en sedimentos son especialmente importantes, estos son indicadores de acumulación de trazas de distintos metales y todo lo que entra en contacto con el agua por procesos erosivos y de transporte de sedimentos, como sucede en la actividad minera.

La siguiente tabla muestra los parámetros analizados:

TABLA 3 PARÁMETROS A ANALIZAR  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Parámetro		
Parámetros <i>in situ</i>	Agua	Potencial de hidrógeno (pH)
		Conductividad eléctrica
		Temperatura
		Potencial de óxido reducción (ORP o Eh)
		Sólidos disueltos totales (TDS)
		Bario (Ba)
		Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
		Cobre (Cu)
		Nitratos (HNO <sub>3</sub> )
		Manganeso (Mn)
		Parámetros Laboratorio
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )		
Cobre (Cu)		
Uranio (U)		
Agua y Sedimentos (especiación química)	Arsénico (As)	
	Mercurio (Hg)	
Sedimentos (extracción secuencial)	Plomo (Pb)	
	Zinc (Zn)	
	Manganeso (Mn)	
	Cadmio (Cd)	

<sup>24</sup> La cuenca tiene una precipitación media anual que varía entre 66 y 2.065 mm, con un ciclo anual de tendencia bimodal, con dos periodos lluviosos (marzo – mayo y septiembre – noviembre) y dos secos (diciembre – febrero y junio – agosto) según indica el EIA del proyecto Soto Norte

Los datos fisicoquímicos de agua se tomaron con los instrumentos indicados en la siguiente tabla:

TABLA 4 INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN TOMA DE DATOS IN SITU  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Instrumento	Parámetro medido
Papel tornasol	pH
Multiparámetro Hanna 98129	pH, temperatura, conductividad, TDS
Multiparámetro Hanna 98120	ORP
Colorímetro Hach DR 900	Bario, sulfatos, cobre, nitratos, manganeso

Los análisis de laboratorio seleccionados fueron:

- i) Especiación química, la cual consiste en determinar las distintas formas químicas en que los metales están presentes en el agua/sedimento bajo distintos ambientes (oxidante o reductor). En otras palabras, es conocer los distintos estados de oxidación y con ello determinar su toxicidad.
- ii) Análisis de extracción secuencial (método BCR), que es un procedimiento analítico que permite determinar la biodisponibilidad y la movilidad de los metales, a partir de la diferenciación de 4 fases para cada elemento.
- iii) Ensayos de presencia de nitratos, sulfatos, cobre y uranio teniendo en cuenta las mediciones *in situ* y la información secundaria de referencia.

La selección de los parámetros a analizar *in situ* y laboratorio se hizo de acuerdo a la disponibilidad de información geológica, geoquímica y de calidad de agua. La información geológica fue consultada en informes del Servicio Geológico Colombiano y los EIA de Angosturas y Soto Norte, de donde se tomó también información geoquímica y de calidad de agua empleada como referencia.

Por la geología propia de la región y el yacimiento, las características de la actividad minera desarrollada en el territorio y la afectación que esta genera en la calidad de agua superficial se tuvieron en cuenta aquellos parámetros que indican alteraciones asociadas al aporte de Sólidos Disueltos Totales (SDT), pH, concentración de iones (conductividad) y sustancias tóxicas utilizadas en la actividad minera teniendo en cuenta la normativa nacional e internacional presentada a continuación:

TABLA 5 CRITERIOS DE CALIDAD ADMISIBLES PARA LA DESTINACIÓN DE AGUA PARA DIFERENTES USOS  
NACIONALES E INTERNACIONALES  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

PARÁMETROS	Unidades	RES. 2115/2007	Decreto 1594/1984			OMS 2006	EPA	U. EUROPEA
		Consumo	C. humano y doméstico	Agrícola	Pecuario	Efectos en la salud humana	pueden dañar salud humana al consumirse	Consumo humano
<b>Conductividad</b>	µS/cm	1000						
<b>pH</b>		6,5 – 9,0	5,0 – 9,0	4,5 – 9,0			6,5 – 8,5	

PARÁMETROS		Unidades	RES. 2115/2007	Decreto 1594/1984			OMS 2006	EPA	U. EUROPEA
			Consumo	C. humano y doméstico	Agrícola	Pecuario	Efectos en la salud humana	pueden dañar salud humana al consumirse	Consumo humano
<b>Arsénico</b>	As	mg/l	0,01	0,05	0,1	0,2	0,01	0,01	0,01
<b>Bario</b>	Ba	mg/l	0,7	1			0,07	2	
<b>Cadmio</b>	Cd	mg/l	0,003	0,01	0,01	0,05	0,03	0,005	0,05
<b>Cobre</b>	Cu	mg/l	1	1	0,2	0,5	2	1	
<b>Plomo</b>	Pb	mg/l	0,01	0,02			0,01		0,01
<b>Nitratos</b>	NO <sub>3</sub> -	mg/l	10	10		100	50	10	50
<b>Manganeso</b>	Mn	mg/l	0,1		0,2		0,4	0,05	
<b>Sulfatos</b>	SO <sub>4-2</sub>	mg/l	250	400			500	250	
<b>Zinc</b>	Zn	mg/l	3	15	2	25	3	5	
<b>Uranio</b>	U	mg/l					0,015	0,03	

## 4.2 Selección de puntos de muestreo

Para seleccionar los puntos de muestreo se consultó información de geología, geoquímica y calidad de agua en los Estudios de Impacto Ambiental de los proyectos Soto Norte (de Minesa), Angosturas (de Eco Oro), y el Servicio Geológico Colombiano. Estos datos fueron georreferenciados usando el software ARCGIS para poder establecer una zona de trabajo que cumpliera los siguientes criterios:

- Minería de oro como principal actividad económica.
- Disponibilidad de información geológica, geoquímica y de calidad de agua.
- Cuerpos de agua en los que se pueda establecer un punto de control libre de actividades productivas.

Con ayuda de la comunidad, se establece como área de estudio la cuenca alta de la quebrada Páez por ser un ecosistema de páramo libre de actividades antrópicas (3.600 m.s.n.m.), y la cuenca media y baja de la quebrada La Baja que recibe las aguas afectadas por minería de oro tradicional y los proyectos Soto Norte y Angosturas. Adicionalmente es en la quebrada La Baja donde se registraron las anomalías de uranio, de acuerdo con lo consignado en los informes del Instituto Geológico Nacional (1955), las estaciones de muestreo definidas se ilustran en la siguiente figura:

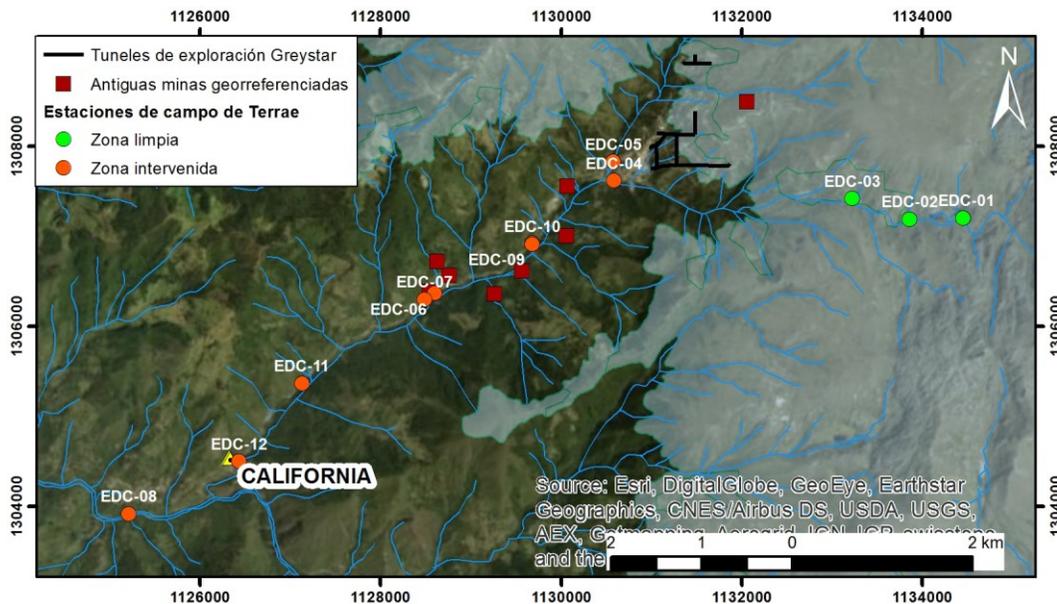


FIGURA 2 ESTACIONES DE MUESTREO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En campo se obtuvo registro *in situ* de 11 puntos los cuales incluyen la laguna de Páez y la quebrada Páez en su parte alta sin intervención antrópica como zonas limpias y la misma quebrada Páez y la quebrada Angosturas en sus tramos bajos donde recogen los drenajes de actividad minera. Con dichos registros fueron evaluados parámetros fundamentales para un análisis inicial de las condiciones de calidad del agua como pH, conductividad, potencial de óxido reducción, entre otros.

TABLA 6 ESTACIONES DE CAMPO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estación	Coordenadas	Sector	Estado de conservación/Usos principal
EDC-01	N 1307509 E 1134069	Quebrada que entra a la Laguna Páez en el páramo	Conservada, sin alteración ni actividades productivas alrededor
EDC-02	N 1307495 E 1133476	Quebrada Páez al salir de la laguna Páez	Conservada, sin alteración ni actividades productivas alrededor
EDC-03	N 1307724 E 1132844	Quebrada Páez en el páramo	Conservada, sin alteración ni actividades productivas alrededor
EDC-04	N 1307920 E 1130200	Quebrada Páez antes de la intersección con la quebrada Angosturas	Este punto ya recoge agua de drenajes de minería de pequeña escala y el proyecto Soto Norte

Estación	Coordenadas	Sector	Estado de conservación/Usos principales
EDC-05	N 1308134 E 1130192	Quebrada Angosturas antes de la intersección con la quebrada Páez	Este punto ya recoge agua de drenajes de minería de pequeña escala y el proyecto Angosturas. Justo antes hay un drenaje de mina.
EDC-06	N 1306675 E 1128212	Quebrada La Baja, sector La Baja	Quebrada que recoge las aguas de las quebradas Páez, Angosturas y drenajes de minería de pequeña escala.
EDC-08	N 1304225 E 1124821	Quebrada La Baja, sector el Molino después del caserío.	Este punto de la quebrada La Baja recoge las aguas de la quebrada Vetas, drenajes de minería de pequeña escala y aguas del caserío
EDC-09	N 1307228 E 1129298	Quebrada La Baja, sector Gigante	Este punto recoge agua de drenajes de minería de pequeña escala
EDC-10	N 1307218 E 1129296	Drenaje de mina que cae a la quebrada La Baja	Este es un drenaje de minería de pequeña escala
EDC-11	N 1305672 E 1126746	Quebrada La Baja, sector La Plata	Este punto de la quebrada la Baja es antes de California, recoge agua de drenajes de minería de pequeña escala y caseríos
EDC-12	N 1304806 E 1126048	Quebrada Tronadora	A esta quebrada desemboca la quebrada La Baja, recoge también las aguas del municipio de California

Los datos fisicoquímicos de agua se tomaron con los instrumentos indicados anteriormente en la Tabla 4:

El papel tornasol permite mediante una inspección visual una aproximación al pH de la muestra de agua, los multiparámetros Hanna 98129 y 98120 cuentan con sensores de temperatura, pH/redox, conductividad eléctrica (CE) y el colorímetro Hach DR 900 permite medir la absorbancia de una disolución en una frecuencia de luz específica definida por el usuario del equipo, esto mide la concentración de un soluto conocido proporcional a la absorción de luz. El equipo fue usado para medir sulfatos, cobre, bario, nitratos y manganeso.

El colorímetro es un instrumento que funciona bajo el principio de la espectrofotometría: se emite un haz de luz en una frecuencia específica que atraviesa la muestra de agua a analizar y mediante un sensor mide la absorbancia de esa disolución. La disolución debe ser preparada con reactivos especiales que dependen de la sustancia cuya concentración se desea detectar. Diferentes sustancias absorben diferentes longitudes de onda, por lo que la absorbancia es proporcional a la concentración de ese elemento analizado. Este equipo presenta la ventaja de ser portátil, requiere poco tiempo en la medición, y tiene una rápida curva de aprendizaje por la simplicidad de su uso.

Para la medición de parámetros *in situ* fue necesario calibrar el multiparámetro Hanna 98120 antes del inicio de la fase de campo. Los otros equipos no requirieron calibración debido a que eran nuevos para el momento del trabajo de campo y para su manejo fueron atendidas las recomendaciones del manual de operación y capacitaciones.

La medición con multiparámetros se realizó sumergiendo el sensor por completo en el cuerpo de agua y esperando a que la medida se estabilizara, después se procedía a anotar y registrar los valores y coordenadas del sitio mediante GPS.

Para el colorímetro se recolectaron y filtraron muestras de agua según indicaciones del manual de operación, se adicionaron los reactivos necesarios para poder medir la concentración deseada y se siguió el procedimiento sugerido según el elemento a detectar.



FOTOGRAFÍA 1 COLORÍMETRO MIDIENDO LA CONCENTRACIÓN DE COBRE EN UNA MUESTRA

### 4.3 Recolección y almacenamiento de muestras de agua y sedimentos

El muestreo se hizo de forma manual, ya que este se realiza en sitios de fácil acceso. El tipo de muestra seleccionada fue puntual, tomada en un lugar representativo empleando los envases respectivos y purgándolos tres veces con el agua que sería muestreada como se ve en la siguiente fotografía:



FOTOGRAFÍA 2. PURGA DE ENVASES REALIZADA PARA LA RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA

Una vez definido el tipo de muestra y los parámetros por analizar, se alistaron los envases, preservantes, neveras y geles refrigerantes que serían utilizados para conservar las muestras durante su almacenamiento y transporte hacia el laboratorio. Se siguieron las recomendaciones para el tipo de envase, la preservación y el almacenamiento de muestras

de agua propuesto por los laboratorios y los requerimientos del IDEAM presentados en la siguiente tabla:

TABLA 7 REQUERIMIENTOS DE ENVASE, PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO AMIENTO DE MUESTRAS  
FUENTE: MODIFICADO DE IDEAM, S.F.<sup>25</sup>

Determinación	Tipo de recipiente	Volumen mínimo de muestra [mL]	Tipo de muestra	Preservación	Tiempo máximo
Uranio	V ámbar	500	s, c	Refrigerar	28 días
Nitrato	P, V	100	s, c	Refrigerar	48 horas
Sulfato	P, V	100	s, c	Refrigerar	28 días
Metales: Mercurio	P(A), V(A)	500	s, c	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> al 5% en HNO <sub>3</sub> hasta pH<2, 4°C, refrigerar	28 días
Metales, general	P(A), V(A)	500	s	Filtrar, agregar HNO <sub>3</sub> hasta pH<2	6 meses

P: Plástico, V: Vidrio, S.c: Simple o compuesta

Los sedimentos se recolectaron tomando muestras de un 1 kg en 4 puntos a una distancia menor de 10 metros entre ellos, se mezclaron estas muestras y se procedió a tomar y embalar una única muestra de sedimentos con la menor cantidad de aire y agua posible.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas en los siguientes laboratorios:

- Biopolab: Muestras de agua para análisis de presencia de uranio y bario.
- Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental, Universidad de Córdoba: Muestras de sedimento para análisis de especiación química y extracción secuencial de arsénico, mercurio, manganeso, cadmio, plomo, zinc, y muestras de agua especiación química para análisis de arsénico, mercurio, nitratos, sulfatos, cobre, manganeso.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Resultados e interpretación de parámetros *in situ*

Se realizó la toma de datos de parámetros *in situ* sobre los cuerpos de agua visitados durante la fase de campo. Los resultados de estos parámetros para los 11 puntos monitoreados se presentan en la siguiente tabla, la Figura 2 presentada en el capítulo anterior muestra su ubicación sobre las quebradas Páez, Angosturas, La Baja y Tronadora.

TABLA 8 RESULTADOS DE PARÁMETROS *IN SITU* TOMADOS EN LA FASE DE CAMPO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estación	pH	CE [µS/cm]	ORP [mV]	Sulfatos [mg/L]	Mn [mg/L]	Ba [mg/L]	Nitratos [mg/L]	Cu [mg/L]
EDC-01	7,1	30	204	6	0,002	0	1,5	0

<sup>25</sup> Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá D.C., de acuerdo a las recomendaciones del laboratorio Biopolab y del Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba

Estación	pH	CE [μS/cm]	ORP [mV]	Sulfatos [mg/L]	Mn [mg/L]	Ba [mg/L]	Nitratos [mg/L]	Cu [mg/L]
EDC-02	7,7	25	196	0		19	2,4	0,03
EDC-03	7,6	33	184	5	0,003	5	0	0,03
EDC-04	7,4	70	125	5	0,031	0	1,2	0
EDC-05	7,6	167	127	1	0,025	3	0	0,05
EDC-06	8,2	392	124	+++	0,352	2	0	0,15
EDC-08	7,4	174	187	52	0,406	4	0	0,12
EDC-09	7,4	434	91	+++	0,294	0	5,9	0,06
EDC-10	6,3	1883	73	+++	+++	---	---	3,74
EDC-11	8,1	369	126	+++	0,474	0	0,2	0,09
EDC-12	8,2	365	144	+++	0,442	0	0,1	0,06

+++ : Por encima del límite de medición del equipo

---- : Entre 0 y el límite inferior de detección del equipo

Las estaciones EDC-01, EDC-02 y EDC-03 están en la parte alta de la quebrada Páez en zona de páramo y son la línea base, pues en esa zona no hay ningún tipo de actividad productiva que afecte la calidad del agua. El resto de los puntos de muestreo están ubicados aguas abajo a lo largo de diferentes quebradas, recibiendo drenajes de minas, caseríos y el municipio de California hasta desembocar en la quebrada Tronadora. Este muestreo permite evaluar la afectación a la calidad del agua a medida que se recorre la cuenca. Una descripción más detallada de cada estación se fue presentada en la sección 4.2, Tabla 6.

### 5.1.1 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH indica la acidez o alcalinidad de una disolución (concentración de H<sup>+</sup> u OH<sup>-</sup>) y toma valores usuales entre 0 y 14, siendo neutro cuando el valor es 7, ácidos los valores menores a 7 y alcalinos los mayores a 7. La escala de pH es logarítmica, es decir, un cambio de pH de 6 a 5 significa que la disolución se tornó 10 veces más ácida.

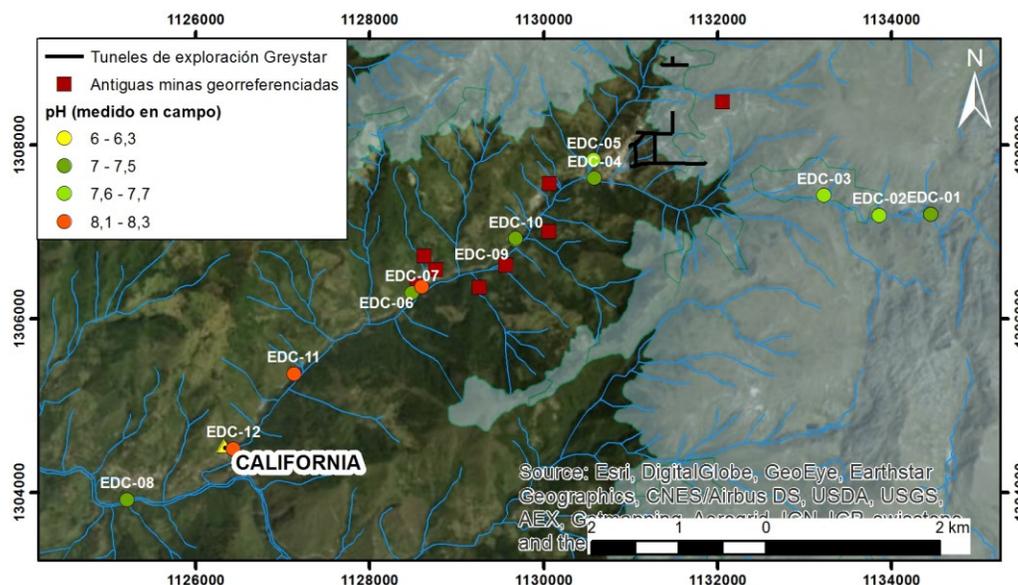


FIGURA 3 PH MEDIDO EN CAMPO POR TERRAE  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Los resultados de pH de los puntos descritos en la Tabla 6 varían entre 6,3 y 8,2. El valor más bajo corresponde a un vertimiento de mina (EDC-10) y los más altos a la quebrada La Baja y Tronadora. La anterior figura muestra los valores de pH medidos directamente en el cuerpo de agua.

El pH medido en los puntos EDC-01, EDC-02 y EDC-03 (7,1; 7,6 y 7,6 respectivamente) es cercano a neutro y al 6,8 reportado en el EIA del proyecto Angosturas en la Laguna de Páez (mismo sitio), esta diferencia puede deberse a que la lluvia es ligeramente ácida y las mediciones de Angosturas se tomaron en época de lluvias.

El punto EDC-4 recoge los drenajes de varias minas de pequeña escala, después de tomar la primera medida (de 7,4) el agua se tornó turbia y de color gris, una nueva medición arroja un pH de 7,7. Este cambio puede ser producto de la descarga de una mina aguas arriba, lo que evidenciaría una tendencia a la alcalinización del agua por algunas de las actividades mineras (quizá asociada al uso de hidróxido de sodio como alcalinizante para usar cianuro).

En el drenaje de mina de la estación EDC-10 se midió un pH de 6,3, valor por debajo de lo permitido en la Resolución 2115 del 2007. A diferencia de la estación EDC-04, los drenajes que se generan en esta bocamina tienen naturaleza ligeramente ácida, en comparación con los demás puntos medidos en la campaña de campo.

Finalmente, en los puntos medidos aguas abajo de las bocaminas georreferenciadas sobre la quebrada La Baja, los valores de pH resultaron ser mayores a 8, es decir que se observa una alcalinización de las aguas superficiales con relación a las aguas medidas en la cuenca alta de la quebrada La Baja y de su tributario, la quebrada Páez. Esta alcalinización puede deberse a la ganancia de iones a lo largo de las cuencas de estas quebradas, particularmente La Baja donde es más evidente el cambio de pH.

Es importante tener en cuenta que se evidencia una variación del pH del agua, con tendencia a la alcalinización, a medida que esta atraviesa las zonas con intervención minera, tanto minería tradicional como en las zonas de exploración de los proyectos de Angosturas y Soto Norte.

### 5.1.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica corresponde a la habilidad de una solución de transmitir una corriente eléctrica cierta distancia (Hem, 1985)<sup>26</sup>, y su unidad de medida es microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). El aumento en la concentración de sales y otros compuestos (particularmente elementos metálicos) pueden aumentar la conductividad eléctrica del agua. Por esta razón es importante monitorear este parámetro, un incremento en el valor habitual puede ser indicador de aumento de estos compuestos lo cual altera la calidad de las aguas.

Las siguientes figuras muestran los valores de conductividad medidos a lo largo del recorrido:

---

<sup>26</sup> Hem, J. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Third Edition.

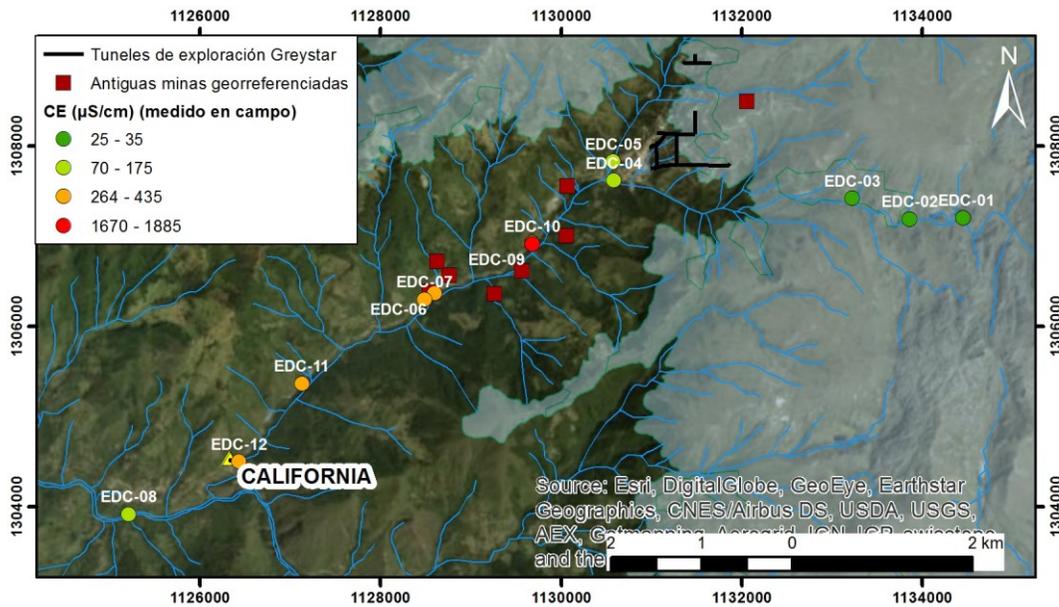


FIGURA 4 MAPA CON VALORES DE CONDUCTIVIDAD  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

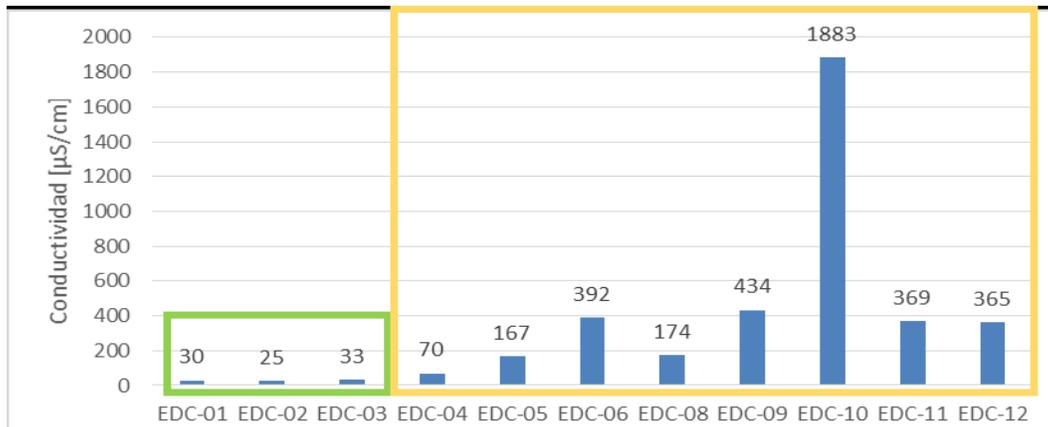


FIGURA 5. CONDUCTIVIDAD A LO LARGO DEL RECORRIDO. LOS VALORES EN EL RECUADRO VERDE SON AGUAS ARRIBA DE ACTIVIDADES MINERAS Y LOS DEL AMARILLO, AGUAS ABAJO, CADA VEZ CON PUNTOS CON VERTIMIENTOS MINEROS.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Los valores que se midieron se encuentran entre 30 y 1883  $\mu\text{S/cm}$ . Los más bajos fueron en zonas de páramo, menores a 35  $\mu\text{S/cm}$  lo cual es acorde a este tipo de ecosistemas en condiciones naturales. Los demás valores se encuentran por encima de 70  $\mu\text{S/cm}$ , aumentando considerablemente a medida que se desciende por la cuenca de la quebrada La Baja. El mayor valor medido corresponde al vertimiento de mina en la estación EDC-10 con 1883  $\mu\text{S/cm}$ , lo cual es coherente con aguas de mina de pH anómalo donde suelen movilizarse gran cantidad de elementos metálicos y sulfatos que aumentan la conductividad del agua.

### 5.1.3 Potencial de óxido reducción (ORP)

El ORP o potencial redox (Eh) es un valor relativo que indica la capacidad de un medio para entregar o recibir electrones, es decir el potencial de oxidación o reducción de un medio. Un valor ORP positivo y de alta magnitud es indicativo de un ambiente que favorece las reacciones de oxidación, mientras que un valor ORP negativo y de baja magnitud es indicativo de un ambiente altamente reductor (Fuentes & Massol-Deyá, 2002<sup>27</sup>)

Los valores de ORP medidos a lo largo de las quebradas Páez y La Baja se encuentran entre 73 y 204 mV. El valor más bajo corresponde al vertimiento de una mina, mientras que el más alto corresponde a una zona sin actividades productivas en los alrededores de la laguna de Páez. En términos generales, no se ve una tendencia clara de modificación del valor de ORP a lo largo de la cuenca evaluada, sin embargo, se observa que los valores más altos (cerca de 200 mV) se encuentran en los puntos dentro del páramo de Santurbán (estaciones EDC-01 a EDC-03), y el valor más bajo (73 mV) corresponde al drenaje de una mina sobre la quebrada La Baja (EDC-10).

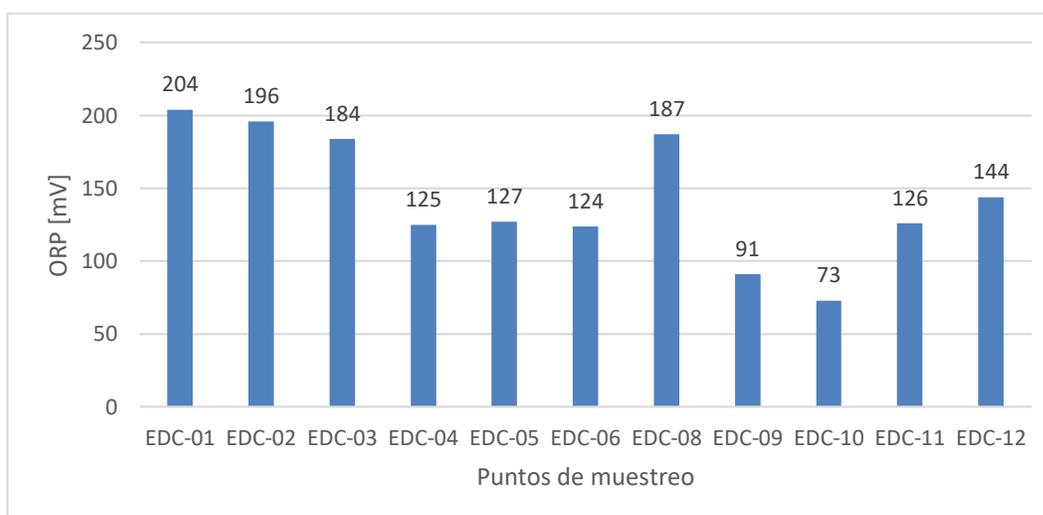


FIGURA 6 ORP A LO LARGO DEL RECORRIDO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Si bien en este caso no es claro un comportamiento del ORP a lo largo de las cuencas evaluadas, es importante tener en cuenta la importancia de este parámetro en el análisis de las características fisicoquímicas del agua, esto particularmente para evaluar la movilidad de elementos o compuestos que pueden afectar la calidad del agua.

### 5.1.4 Comparación de resultados con datos de referencia

La siguiente tabla compara los datos medidos en campo por Terrae con los presentados en los EIA de los proyectos Angosturas de Greystar (hoy Eco Oro) y Soto Norte de Mubadala en estaciones y puntos de medición cercanos espacialmente. Se tomaron solo algunos datos del proyecto de Mubadala que corresponden a temporada seca y la totalidad de datos del proyecto Eco Oro. Es importante aclarar que los datos no tienen por qué ser iguales o

<sup>27</sup> Fuentes, F. Massol-Deyá, A. (2002) *Manual de ecología microbiana*. Segunda parte: parámetros fisicoquímicos: potencial oxidorreducción. Recinto Universitario de Mayagüez. Universidad de Puerto Rico.

similares, pues fueron tomados en sitios y años diferentes, pero si deberían guardar cierta coherencia en función de las condiciones naturales de la zona y las actividades mineras que se presentan.

TABLA 9 COMPARACIÓN DE DATOS *IN SITU* DE TERRAE E INFORMACIÓN DE REFERENCIA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE SOTO NORTE Y ANGOSTURAS

Estación	Proyecto	Código estación	pH	Conductividad [μS/cm]	Sulfatos [mg/L]	Bario [mg/L]	Nitratos [mg/L]	Cobre [mg/L]
EDC-02	Terrae	EDC-02	7,67	25	0	19	2,4	0,03
	Eco Oro	MP-LP-01	6,84	20	17,3		< 0,05	0,06
	Mubadala							
EDC-04	Terrae	EDC-04	7,45	70	5	0	1,2	0
	Eco Oro	MA-QA-03	6,1	55	28,29		0,11	0,11
	Mubadala	PA35	7,33	90	12,11		< 1,5	< 0,10
EDC-05	Terrae	EDC-05	7,57	167	1	3	0	0,05
	Eco Oro	MA-QA-03	6,45	36	23,8		< 0,05	0,08
	Mubadala	PA16	7,53	160	29,74		< 1,5	0,17
EDC-09	Terrae	EDC-09	7,42	434	+++	0	5,9	0,06
	Eco Oro	MB-QLB-01	6,77	91	38,88		< 0,05	0,16
	Mubadala	PA19	7,3	499	111,99		< 1,5	0,12
EDC-06	Terrae	EDC-06	8,19	392	+++	2	0	0,15
	Eco Oro	MB-QLB-03	6,99	135	76,9		< 0,05	0,47
	Mubadala	PA22		649	189,78		< 1,5	0,33
EDC-11	Terrae	EDC-11	8,15	369	+++	0	0,2	0,09
	Eco Oro	MB-QLB-04	7	137	78,5		0,07	0,47
	Mubadala	Sup 07	7,88	402	114,63	<0,5		0,23
EDC-12	Terrae	EDC-12	8,23	365	+++	0	0,1	0,06
	Eco Oro	MB-QLB-05	6,98	133	71		0,10	0,27
	Mubadala	Sup 08	7,93	395,5	127,81	<0,5		0,29
EDC-08	Terrae	EDC-08	7,38	174	52	4	0	0,12
	Eco Oro	RV-03	6,44	77	41,59		< 0,05	0,13
	Mubadala	Sup 10	6,71	137,9	<5	<0,5		<0,1

La variación de pH en las diferentes estaciones se mantiene alrededor de valores naturales, levemente alcalino en los datos de Terrae y Mubadala y ácido en los de Eco Oro. En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores son muy similares en Terrae y Eco Oro, pero Mubadala presenta valores mucho más bajos. Las concentraciones de sulfatos y cobre son similares en todos los casos y mantienen una escala cercana de unidades, en cuanto al bario y nitratos es difícil establecer una similitud general en todas las estaciones, a excepción de EDC-11 y EDC-12.

## 5.2 Resultados e interpretación de análisis de laboratorio

Durante la fase de campo se tomaron muestras de agua y sedimentos en 4 de las estaciones de muestreo (EDC-03, EDC-04, EDC.9 y EDC-10), la descripción de estos puntos se presentó en la Tabla 6 de la sección 4.2, y su selección busca comparar un ambiente de referencia sin contaminación y diferentes puntos con incidencia de actividad minera. Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental

de la Universidad de Córdoba y al Laboratorio de análisis químicos y microbiológicos Biopolab, ambos acreditados por IDEAM. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

TABLA 10 ESPECIACIÓN QUÍMICA DE ARSÉNICO Y MERCURIO EN AGUA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	µg As <sup>3+</sup> /kg	µg As <sup>5+</sup> /kg	µg Hg <sup>2+</sup> / kg	µg MeHg/ kg	µg HgT/Kg
EDC-03	ND	ND	ND	ND	<10
EDC-04	0,76	ND	ND	ND	<10
EDC-09	6,74	ND	ND	ND	18,35
EDC-10	8,61	2,54	ND	ND	32,22

TABLA 11. ESPECIACIÓN QUÍMICA DE ARSÉNICO Y MERCURIO EN SEDIMENTOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estación	µg As <sup>3+</sup> /Kg	µg As <sup>5+</sup> /Kg	µg Hg <sup>2+</sup> /Kg	µg MeHg/Kg
EDC-03	124,29	ND	25,4	ND
EDC-04	2196,17	235333,7	788,9	ND
EDC-09	537,44	81446,7	641,8	ND
EDC-10	2282,43	106025,2	488,1	ND

TABLA 12 PRESENCIA DE MINERALES EN AGUA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Estación	Nitratos [mg NO <sub>3</sub> -/L]	Sulfatos [mg SO <sub>4</sub> -/L]	Cobre [mg Cu/L]	Manganeso [mg Mn/L]	Uranio [mg / L]	Bario [mg / L]
EDC-03	<1,0	32,6	<0,1	<0,1	0,0044	<0,141
EDC-04	<1,0	100,72	<0,1	<0,1	0,0006	0,141
EDC-09	<1,0	294,48	0,19	0,28	<0,0005	<0,141
EDC-10	12,61	1249,66	7,08	5,6	0,043	<0,141

TABLA 13 EXTRACCIÓN SECUENCIAL EN SEDIMENTOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Elemento		Estación			
		EDC-03	EDC-04	EDC-09	EDC-10
µg Pb/kg	F1	<25	394,18	364,99	136,59
	F2	136,98	3098,84	2195,48	1682,24
	F3	266,2	2533,37	893,51	2255,91
	F4	3925,82	25339,44	15131,49	20110,89
	Total	<b>4346,4</b>	<b>31365,83</b>	<b>18585,47</b>	<b>24185,63</b>
µg Cd/kg	F1	<7,5	<7,5	9,04	33,18

Elemento	Estación				
	EDC-03	EDC-04	EDC-09	EDC-10	
	F2	<7,5	<7,5	8,13	61,25
	F3	7,81	442,02	781,78	6267,54
	F4	<7,5	678,67	700,97	7492,31
	<b>Total</b>	<b>&lt;25</b>	<b>1129,56</b>	<b>1499,92</b>	<b>13854,28</b>
mg Zn/kg	F1	4,05	57,22	27,71	26,5
	F2	2,7	80,16	14,35	23,56
	F3	2,9	23,21	26,53	4,79
	F4	22,88	94,78	30,49	91,24
	<b>Total</b>	<b>32,52</b>	<b>255,38</b>	<b>99,08</b>	<b>146,1</b>
mg Mn/kg	F1	29,83	12,03	36,2	43,02
	F2	54,42	17,16	36,99	110,07
	F3	<5	<5	11,92	15,76
	F4	102,14	5,51	25,45	26,21
	<b>Total</b>	<b>188,95</b>	<b>36,07</b>	<b>110,56</b>	<b>195,06</b>

### 5.2.1 Especiación química

#### 5.2.1.1 Arsénico en aguas y sedimentos

##### - En aguas

Como se muestra en la Tabla 10, los análisis de laboratorio arrojaron como resultado la presencia de varias especies químicas de arsénico en el agua, entre ellas el arsenato As (V) y el arsenito As (III), esta última más tóxica y movilizable en el ambiente. El arsenito fue detectado en 3 de los 4 puntos muestreados, todos ellos aguas abajo de donde se realiza actividad minera. El drenaje de mina EDC-10 tuvo el valor más alto: 8,61  $\mu\text{gAs}^{3+}/\text{Kg}$ . En cuanto al As (V), fue detectado en el drenaje de mina (EDC-10) pero el equipo no pudo arrojar un valor, lo que indica que su presencia es menor a 12  $\mu\text{gAs}^{5+}/\text{Kg}$  (límite de detección del equipo).

Los resultados de especiación química mostraron que la forma trivalente del arsénico As (III) o arsenito es la más abundante en el agua, lo cual es preocupante dado que en aguas de ríos y lagos la forma pentavalente As (V) debería ser la especie dominante (Pettine, 1992)<sup>28</sup>. El As (III) es la especie más tóxica de arsénico y es dominante en condiciones oxidantes con pH alcalino (Montoya, Montañez, Luévanos, Balagurusamy, 2015)<sup>29</sup>, lo cual es coherente con los valores de pH medidos en la mayoría de estaciones.

<sup>28</sup> Pettine, Maurizio. (1992). *Dissolved and particulate transport of arsenic and chromium in the Po River (Italy)*.

<sup>29</sup> Montoya, Edelweiss; Montañez, Lilia; Luévanos, Miriam; Balagurusamy, Nagamani. (2015). *Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos*.



FIGURA 7. RESULTADOS DE ESPECIACIÓN QUÍMICA DE ARSÉNICO EN AGUA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#### - En sedimentos

Las muestras en sedimentos depositados en el lecho de ríos y quebradas son claves pues transportan gran cantidad de nutrientes y contaminantes (Bartram y Ballance, 1996)<sup>30</sup>, también dan un análisis integral y a largo plazo de los elementos movilizados en la zona complementando los análisis de agua.

El arsénico fue encontrado también en muestras de sedimentos de todos los puntos investigados (ver Tabla 11), la estación de la laguna de Páez en zona de páramo (EDC-03) tuvo el valor más bajo de arsenito ( $124,29 \mu\text{gAs}^{3+}/\text{Kg}$ ) y no detectado para arsenato. Las concentraciones fueron aumentando a medida que la quebrada recibe drenajes de actividad minera.

En la parte baja de la quebrada Páez (EDC-04) que ya es afectada por la actividad minera el arsenito encontrado fue de  $2196,17 \mu\text{gAs}^{3+}/\text{Kg}$ , valor casi 20 veces mayor al de la misma quebrada en su parte alta (EDC-03). También hay valores de  $235 \text{mgAs}^{5+}/\text{Kg}$  de arsenato en el mismo punto, 100 veces más que el arsenito de la misma estación. Comparado estos valores y los medidos en los demás puntos de muestreo (EDC-09 y EDC-10) con la baja presencia de estas especies de arsénico en la parte alta de la quebrada (EDC-03) se podría establecer una relación espacial con la actividad minera en la zona.

En las muestras de sedimento predominó el arsénico pentavalente As (V) o arsenato, cuya presencia es dominante bajo condiciones oxidantes y pH ácido en ambientes acuosos y aerobios (Oremland y Stolz, 2003)<sup>31</sup>, lo que coincide con las condiciones del drenaje de mina (EDC-10) en que esta especie de arsénico predomina sobre As (III). Ahora, es importante tener en cuenta que esta especie de arsénico, a las condiciones de pH y ORP medidas en campo, debe estar asociada a los oxianiones  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$  (moléculas

<sup>30</sup> Bartram, Jaime; Ballance, Richard. (1996). *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater. Quality Studies and Monitoring Programmes.*

<sup>31</sup> Oremland, R. S. and J. M. Stolz. (2003). *The ecology of arsenic.*

con carga negativa) que están ligadas al sedimento dadas las condiciones de pH neutrales. Si el pH del sedimento o del agua que lo acompaña llega a aumentar (pH mayor a 9), estos oxianiones ya no serán retenidos por el sedimento, lo cual generará un aumento en la concentración As (V) en el agua del área.

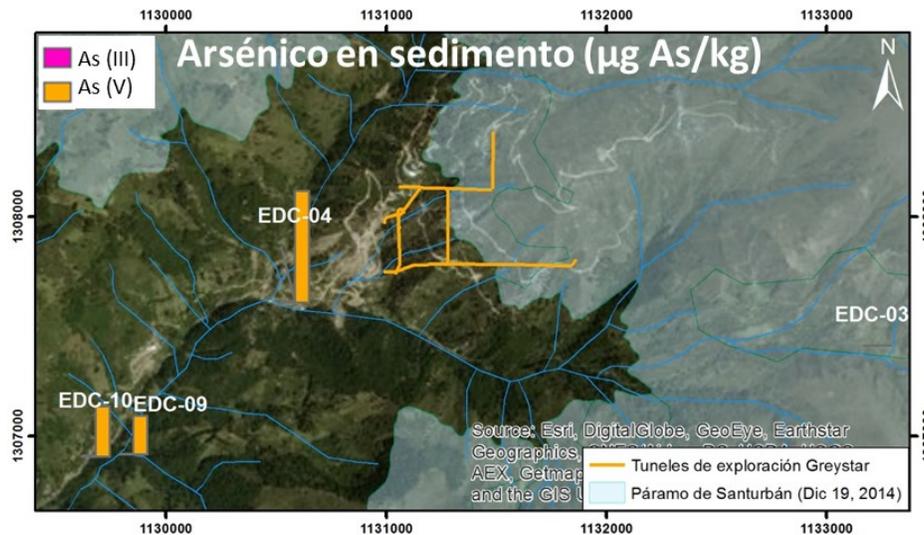


FIGURA 8. RESULTADOS DE ESPECIACIÓN QUÍMICA DE ARSÉNICO EN SEDIMENTO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 5.2.1.2 Mercurio en aguas y sedimentos

En las pruebas de laboratorio se analizó la presencia de metilmercurio (MeHg), mercurio (II) ( $Hg^{2+}$ ) y mercurio total (HgT). Como se mencionó antes existe una relación entre el potencial redox y la actividad microbiana que genera procesos como el transporte ambiental de metales, el mercurio participa en procesos de metilación bacteriana que transforma compuestos inorgánicos en formas organometálicas (metilación bacteriana), a pesar de ello, los análisis de laboratorio no detectaron la presencia de metilmercurio.

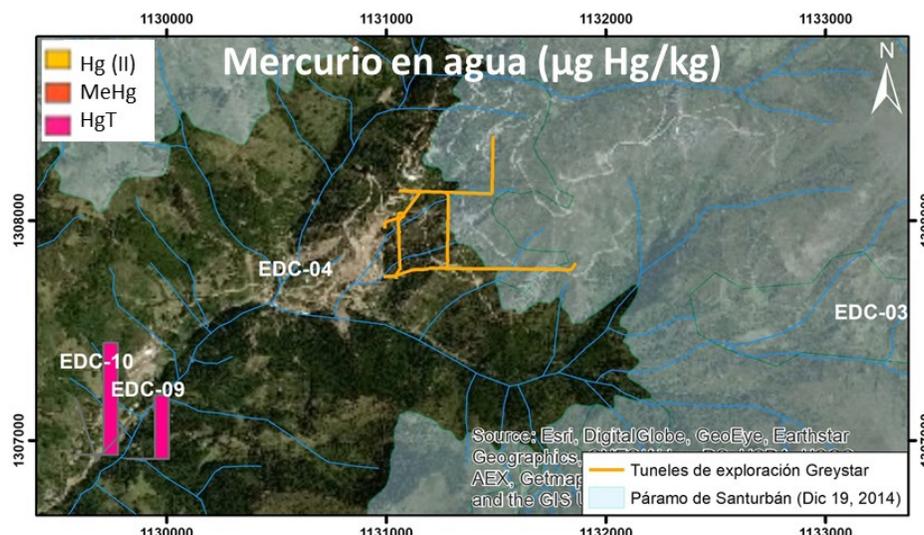


FIGURA 9. RESULTADOS DE ESPECIACIÓN QUÍMICA DE MERCURIO EN AGUA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se ve en la Tabla 10, en las muestras de agua solo se detectó la presencia de HgT en 2 de las estaciones: EDC-09 y EDC-10, los valores fueron 18,35 y 32,22  $\mu\text{g HgT/L}$  respectivamente, lo que supera el límite permitido por la resolución 2115 del 2007 de la norma colombiana establecido en 1  $\mu\text{g HgT/L}$ . Estas estaciones están ubicadas en la parte media de la quebrada La Baja que recoge drenajes de minería tradicional y los proyectos Angosturas, Soto Norte y un drenaje de mina, este último muestra el mayor valor (32,22  $\mu\text{g HgT/L}$ ), lo que supone una relación entre el HgT y la actividad minera, particularmente cuando ninguna especie de mercurio fue detectada en la estación de referencia EDC-01.

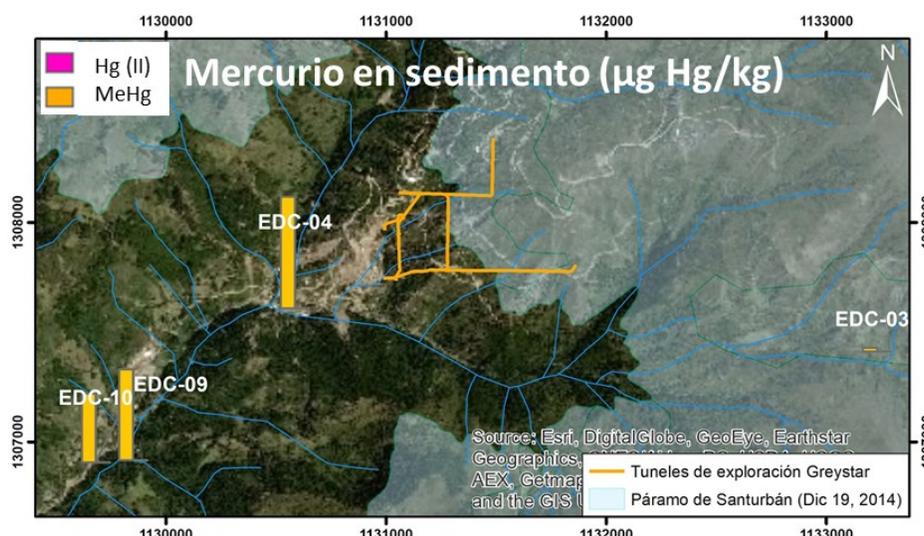


FIGURA 10. RESULTADOS DE ESPECIALIZACIÓN QUÍMICA DE MERCURIO EN SEDIMENTO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En cuanto a los sedimentos cuyos resultados están en la Tabla 11, se detectó la presencia de Hg (II) en todos los puntos de muestreo, en la estación de referencia EDC-01 el valor fue de 25,4  $\mu\text{g Hg (II)/kg}$ , aguas abajo después de pasar por vertimientos de actividad minera estos valores se incrementaron más de 18 veces, el más alto se vio en EDC-04 con 788,9  $\mu\text{g Hg/kg}$ . Esta especie inorgánica del mercurio podría quedar atrapada en el sedimento mediante una variedad de procesos, como la formación de complejos o la quelación con ligandos orgánicos, la sorción en coloides u óxidos de hierro-manganeso y/o la incorporación a la red cristalina de los granos minerales (Biester, Gosar, Covelli, 2000)<sup>32</sup>. El aumento en la concentración de esta especie de mercurio a lo largo de la quebrada puede indicar una relación con la actividad minera, especialmente cuando se detectó un valor de 488,1  $\mu\text{g Hg (II)/kg}$  en EDC-10, correspondiente a un drenaje de mina.

### 5.2.2 Uranio en aguas

Los análisis de laboratorio evidencian la presencia de uranio en todas las muestras de agua, sin embargo, solo en la estación correspondiente al vertimiento de mina (EDC-10) se sobrepasó casi tres veces el límite propuesto por la OMS de 0,015 mg/l. En este punto la medición fue de 0,043 mg/l.

<sup>32</sup> Environ. Sci. Technol." Biester, H., Gosar, M., Covelli, S., (2000). *Mercury speciation in sediments affected by dumped mining residues in the drainage area of the Idrija mercury mine, Slovenia.*

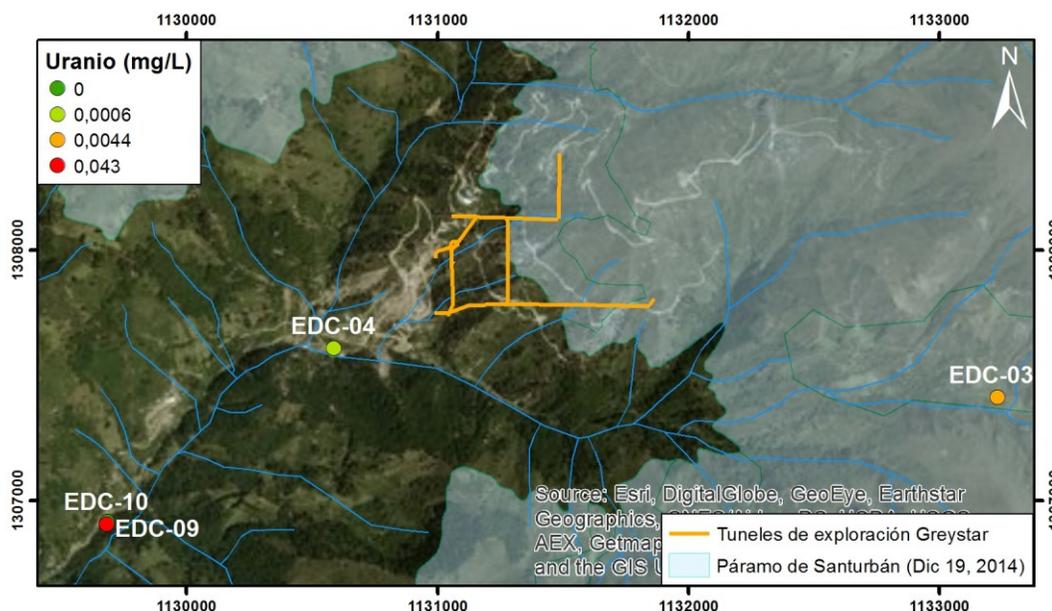


FIGURA 11. RESULTADOS DE PRESENCIA DE URANIO MEDIDO EN AGUA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La liberación del uranio se da por la meteorización que moviliza este metal presente en los yacimientos, eso explica la concentración de 0,0044 mg/L de uranio en la muestra de agua que se tomó de referencia en la parte alta de la quebrada Páez (estación EDC-03). Esta liberación se ve magnificada producto de la actividad minera que produce drenajes ácidos de mina (DAM),” [...] *en general en toda la zona minera hay condiciones muy favorables para que aguas del subsuelo se acidulen por la alteración de compuestos sulfídricos, [...]. De aquí que la disolución de los compuestos de uranio por acción de estas aguas ácidas es allí un proceso de muy fácil ocurrencia” (Bueno, 1955)<sup>33</sup>. Esto explica la alta presencia de este elemento radioactivo en las aguas que drenan de las minas.*

La uranita (UO<sub>2</sub>) es el mineral que se encuentra reportado en los yacimientos descritos en los informes del Instituto Geológico Nacional. En la siguiente figura, el diagrama de estabilidad del uranio en función del Eh-pH, se muestra como este mineral en pH ácidos y ambientes oxidantes se moviliza fácilmente, lo que concuerda con los valores de pH y Eh reportados en campo.

<sup>33</sup> Bueno, Jesús A. (1955). *Yacimientos de Uranio y otros metales en la región de la Baja, municipio de California, departamento de Santander*. Informe No. 1143 Instituto Geológico Nacional.

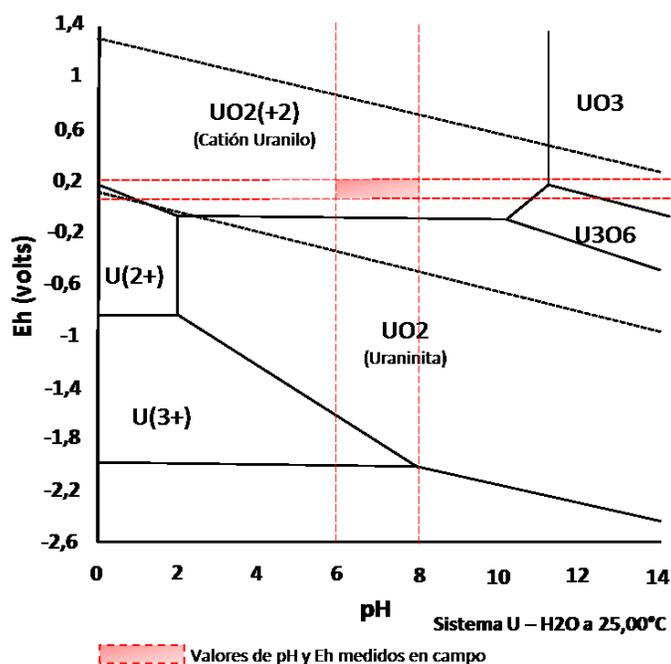


FIGURA 12 DIAGRAMA EH-PH DEL URANIO EN MEDIOS ACUOSOS.  
FUENTE: MODIFICADO DE VILASECA, ZAMORA, CÁRDENAS, 2002<sup>34</sup>

### 5.2.3 Metales detectados por extracción química secuencial (BCR)

Uno de los análisis de laboratorio realizados a las muestras de agua y sedimento fue la especiación química. Esta técnica analítica permite determinar la distribución de un elemento entre las especies químicas en un sistema; en otras palabras, muestra las diferentes formas químicas o estados de oxidación en que un metal está presente lo cual es fundamental para comprender la toxicidad química y su biodisponibilidad. Cada elemento es susceptible a cambios asociados a estos ambientes dependiendo del mineral que formen. Este análisis permite evaluar el riesgo potencial de liberación de contaminantes metálicos al medio ambiente (Espinosa, 2011<sup>35</sup>).

Las extracciones secuenciales evalúan las diferentes formas fisicoquímicas, movilidad y disponibilidad que tienen los metales en un determinado residuo, utilizando para ello diferentes reactivos con diversas capacidades extractantes.

En este método, es posible analizar la presencia de metales en varias fracciones. González E. *et al.* (2011<sup>36</sup>) describen cada una de las fracciones así:

<sup>34</sup> Vilaseca, Nélica; Zamora, Gerardo; Cárdenas, Antonio. (2002). *Tratamiento de minerales de Niobio y Tantalio con alto contenido de Uranio*.

<sup>35</sup> Espinosa, L. F., Parra, J. C., Villamil, C., (2011). Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénaga grande de santa marta, Colombia. [SEPI]

<sup>36</sup> González Flores E. *et al.* (2011). Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27(4) 291-301, 2011

- En la primera, el metal está en 1) forma de ion intercambiable e incluye metales adsorbidos sobre superficies sólidas del suelo (arcillas, óxidos de hierro y manganeso, materia orgánica) y que están retenidos por una interacción electrostática y 2) formando carbonatos. Estos metales pueden ser liberados por un proceso de intercambio iónico. Los iones metálicos intercambiables son una medida de aquellos metales pesados que son liberados más fácilmente en la solución del suelo. Esta etapa representa la fracción con mayor biodisponibilidad.
- La segunda fracción es la reducible, de la cual se extraen metales pesados asociados principalmente a óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, donde los metales pueden estar enlazados por alguno de los siguientes mecanismos o la combinación de ellos: la coprecipitación, la adsorción, la formación de complejos de superficie, el intercambio iónico y la penetración en la estructura cristalina. Los metales pesados unidos a estos minerales son inestables en condiciones reductoras. Esta fracción ocupa el segundo lugar respecto a la biodisponibilidad de metales pesados hacia la solución del suelo.
- La tercera fracción corresponde a la oxidable. Los metales pesados pueden estar asociados por medio de reacciones de complejación a la materia orgánica del suelo, donde las formas solubles son liberadas cuando la materia orgánica es atacada en condiciones oxidantes severas. La biodisponibilidad de esta fracción depende en gran medida del tipo de materia orgánica. Debe tenerse en cuenta que la disponibilidad de estos elementos va a depender de la degradación de la materia orgánica, por lo tanto el descenso del nivel freático por el redireccionamiento de las aguas subterráneas hacia los tajos mineros puede acelerar la su oxidación (FAO, 2005<sup>37</sup>) y dejar así disponibles los elementos que se encuentren asociados a esta.
- La cuarta fracción recomendada por el protocolo de extracción BCR, proporciona información sobre la concentración de los metales que no fueron extraídos en las etapas anteriores y que se considera están recluidos en la estructura cristalina de minerales primarios, por lo tanto su biodisponibilidad es muy baja

### 5.2.3.1 Zinc

La extracción secuencial arrojó los siguientes resultados:

---

<sup>37</sup> FAO (2005). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food and production*. FAO SOILS BULLETIN 80.

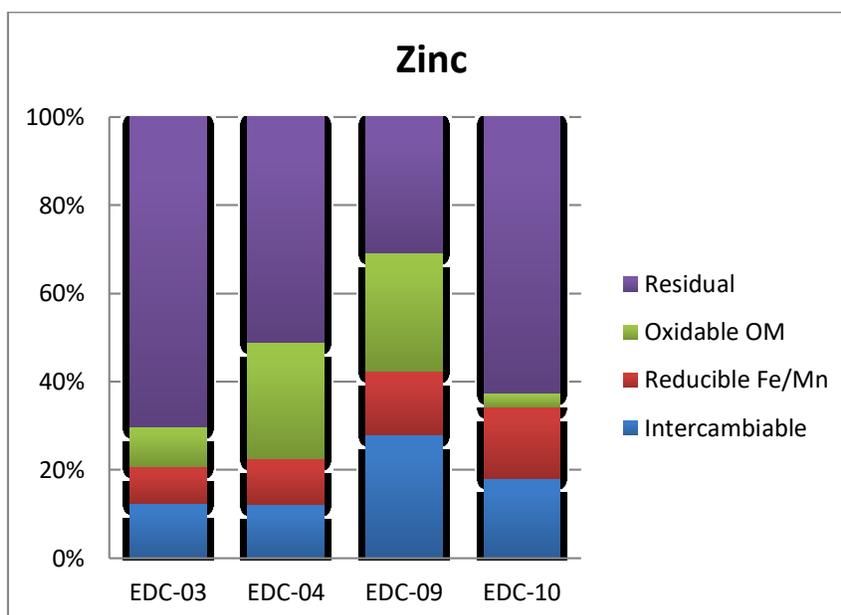


FIGURA 13 RESULTADOS EXTRACCIÓN SECUENCIAL (BCR) DE ZINC  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la estación EDC-03 (quebrada que constituye el desagadero de la laguna Páez la fracción más representativa en la muestra para zinc es la residual con un 70,4%, lo que indica que su biodisponibilidad es muy baja, puesto que fue detectado en mayor proporción en la fracción con menor disponibilidad en el ambiente y menor movilidad. Por tanto, el zinc no es un metal de preocupación en la zona.

En la estación EDC-04 se observa un crecimiento de la fase oxidable en detrimento de la residual, mientras la reducible e intercambiable se mantienen casi estables. Es clave ver la variación de ese punto, pues ahí está la quebrada Páez que recoge los drenajes de minas de pequeña escala y del túnel de exploración hecho de manera irregular por Eco Oro en su proyecto Angosturas.

En EDC-09, Quebrada La Baja, Sector Gigante, cambia la proporción, se tiene el doble de concentración de zinc en su fracción intercambiable (comparada con EDC-03 que corresponde al punto limpio de referencia) que según la literatura es la más biodisponible, es decir, la más riesgosa por tener facilidad de liberar este metal como se indicó anteriormente.

Comienza también a aumentarse la fracción reducible en los puntos EDC-09 y EDC-10 (especialmente en el punto EDC-10 del drenaje de mina). Esta fracción está ligada a los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, lo que se relaciona con los valores de Mn reportados en este punto que salen del rango de medición del equipo utilizado.

Finalmente, en la fracción oxidable la estación EDC-09 reportó mayor concentración, lo que indica un gran aporte de materia orgánica o de ciertas características por el tipo de actividad que se está llevando a cabo a esa altura no necesariamente relacionada con minería.

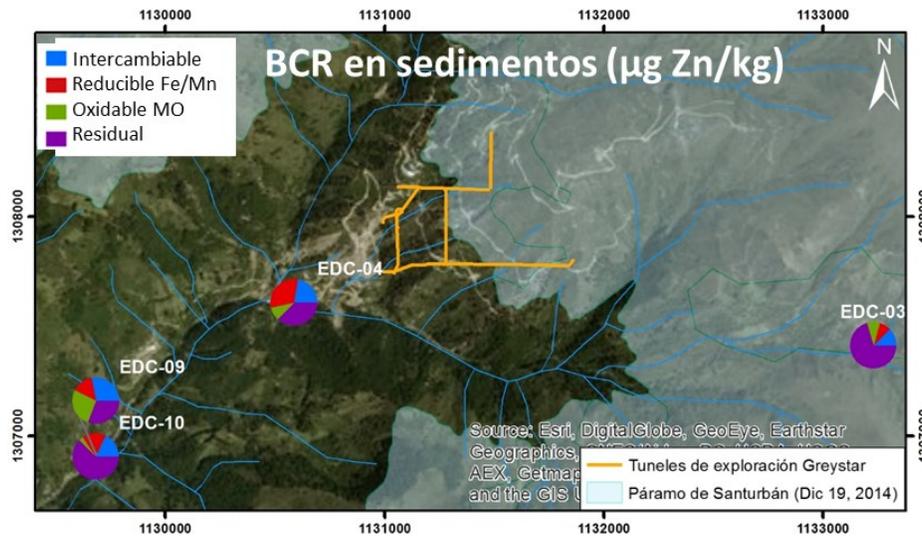


FIGURA 14. RESULTADOS DE EXTRACCIÓN SECUENCIAL (BCR) PARA ZINC EN SEDIMENTOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 5.2.3.2 Plomo:

En todas las estaciones la fracción más representativa en la muestra para plomo es la residual con más del 80%, lo que indica que su biodisponibilidad es muy baja, entonces el Pb no es un metal de preocupación en la zona, puesto que fue detectado en mayor proporción en la fracción con menor biodisponibilidad, es decir, con menor disponibilidad en el ambiente y movilidad.

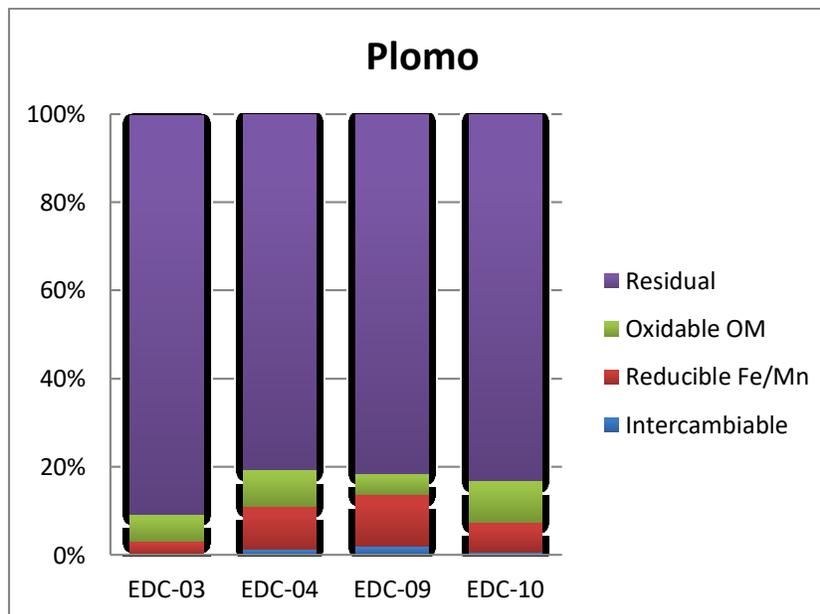


FIGURA 15 RESULTADOS EXTRACCIÓN SECUENCIAL DE PLOMO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Aguas abajo de la estación EDC-03 donde las quebradas empiezan a ser afectadas por la actividad minera se registra un crecimiento en la fracción reducible, ligada a los óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso), lo que se relaciona con los altos valores de manganeso

reportados en todas las estaciones y las relaciona a la actividad minera. También se registra aguas abajo el crecimiento de la fracción intercambiable, puesto que en la estación EDC-03 marcó menos de 25  $\mu\text{g Pb/Kg}$  y aguas abajo, en las estaciones EDC-04, EDC-09 y EDC-10 marcaron 394,18; 364,99 y 136,59  $\mu\text{g Pb/Kg}$  respectivamente, mostrando un crecimiento respecto a las condiciones naturales.

Finalmente, en la fracción oxidable se tiene un comportamiento en general bajo pero irregular en las diferentes estaciones, lo que indica un bajo aporte de materia orgánica.

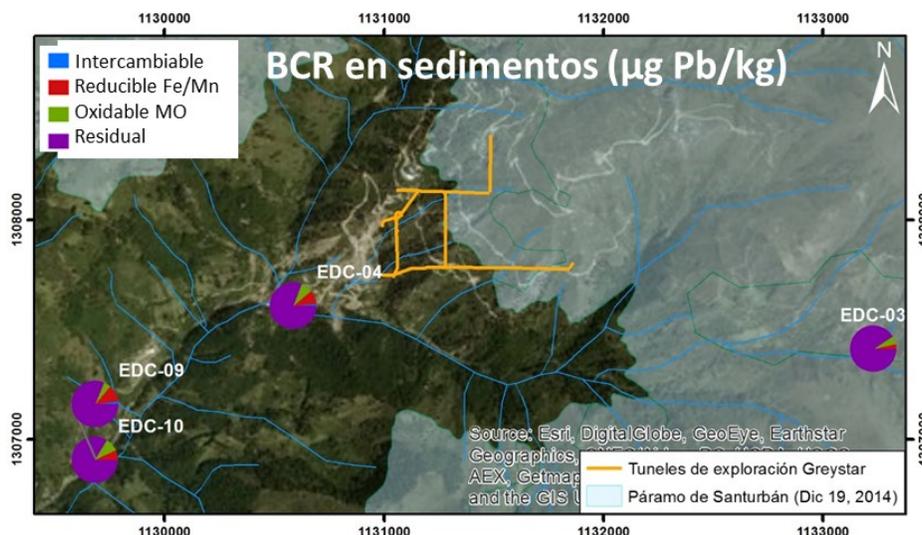


FIGURA 16. RESULTADOS DE EXTRACCIÓN SECUENCIAL (BCR) PARA PLOMO EN SEDIMENTOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 5.2.3.3 Cadmio:

En todas las estaciones la fracción más representativa en la muestra para cadmio es la oxidable, cuya predominancia indica que este metal es liberado cuando la materia orgánica es atacada en condiciones oxidantes severas. La biodisponibilidad depende del tipo de materia orgánica.

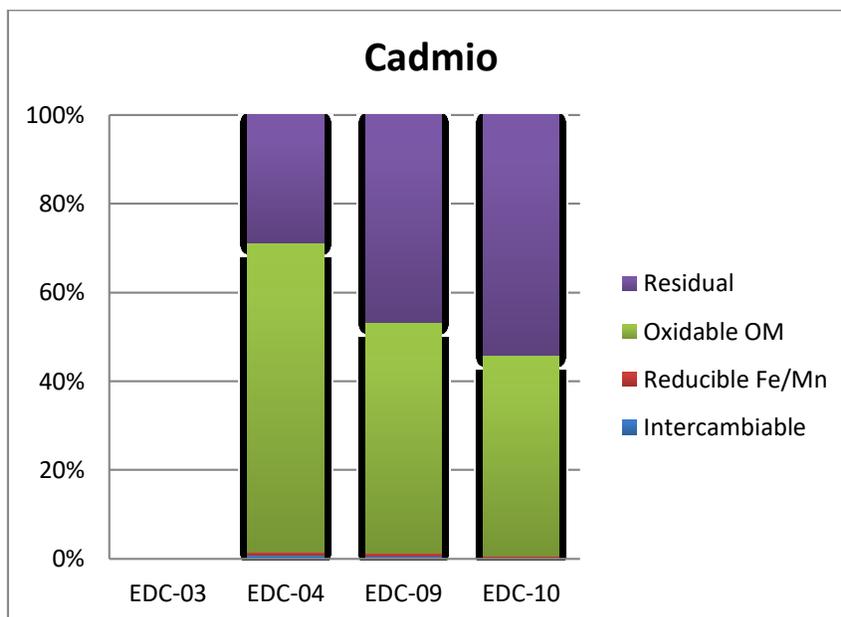


FIGURA 17 RESULTADOS EXTRACCIÓN SECUENCIAL DE CADMIO  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la estación EDC-03 el cadmio expresó concentraciones menores a  $7,5 \mu\text{g Cd/Kg}$  (límite de detección del equipo), solo en la fase oxidable reportó un valor de 7,82.

La fracción residual se relaciona a la parte no extraída en las etapas anteriores y que se considera está recluido en la estructura cristalina de minerales primarios, lo que indica que su biodisponibilidad es muy baja, es decir, menos móvil y por lo tanto con menor disponibilidad para el ambiente.

En general, la amenaza de este metal está fuertemente relacionada al tipo de materia orgánica y las condiciones de oxidación.

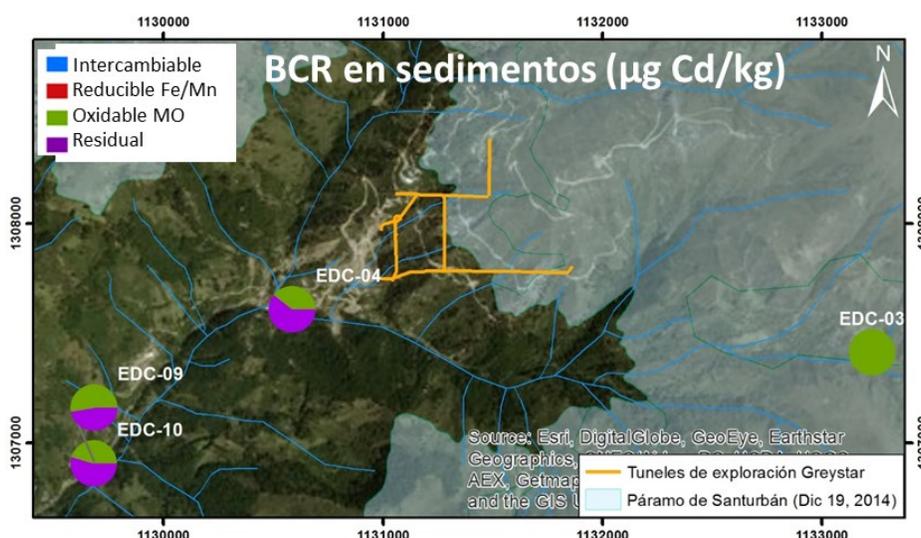


FIGURA 18. RESULTADOS DE EXTRACCIÓN SECUENCIAL (BCR) PARA CADMIO EN SEDIMENTOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#### 5.2.3.4 Manganeso:

La extracción secuencial arrojó los siguientes resultados:

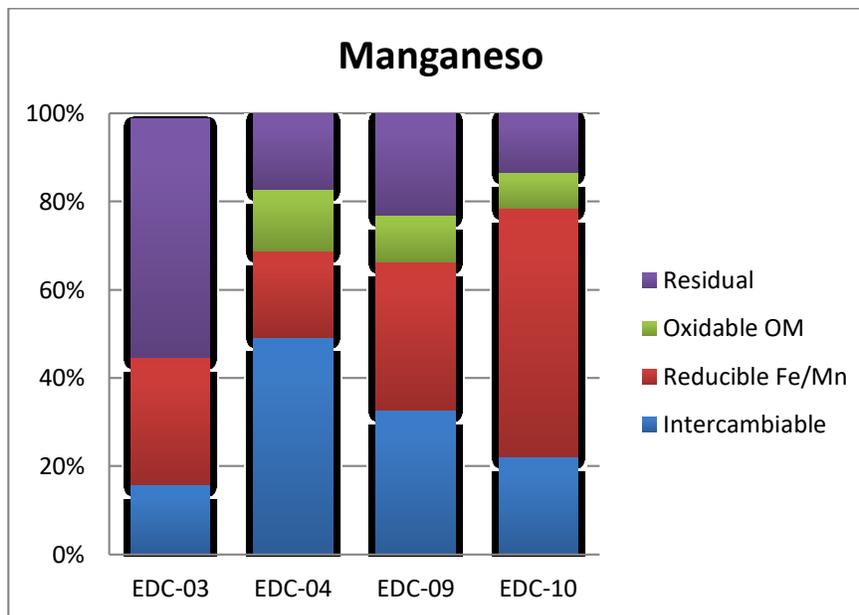


FIGURA 19 RESULTADOS EXTRACCIÓN SECUENCIAL DE MANGANESO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la estación EDC-03 (quebrada que sale de la laguna Páez) la fracción más representativa en la muestra para manganeso es la residual con un 54,1%, lo que indica que su biodisponibilidad baja, sin embargo, la fracción reducible e intercambiable tienen importancia significativa.

En la estación EDC-04 se observa un crecimiento de la fase intercambiable llegando casi al 50% (3 veces más que en la estación EDC-03). Esta fase es la más biodisponible y riesgosa por su facilidad para liberar el manganeso y disponerlo en el ambiente.

Comienza también a aumentarse la fracción reducible en los puntos EDC-09 y EDC-10 (especialmente en el punto EDC-10 del drenaje de mina doblando casi el valor de EDC-03), lo que se relaciona con los altos valores de Mn reportados en otras mediciones de la misma estación. Esto indica que el manganeso es un elemento de especial importancia en la zona.

Finalmente, en la fracción oxidable las estaciones aguas abajo de EDC-03 reportan valores similares, lo que indica un aporte de materia orgánica de las diferentes actividades que se están llevando a cabo en esa zona, que no necesariamente están relacionados con minería.

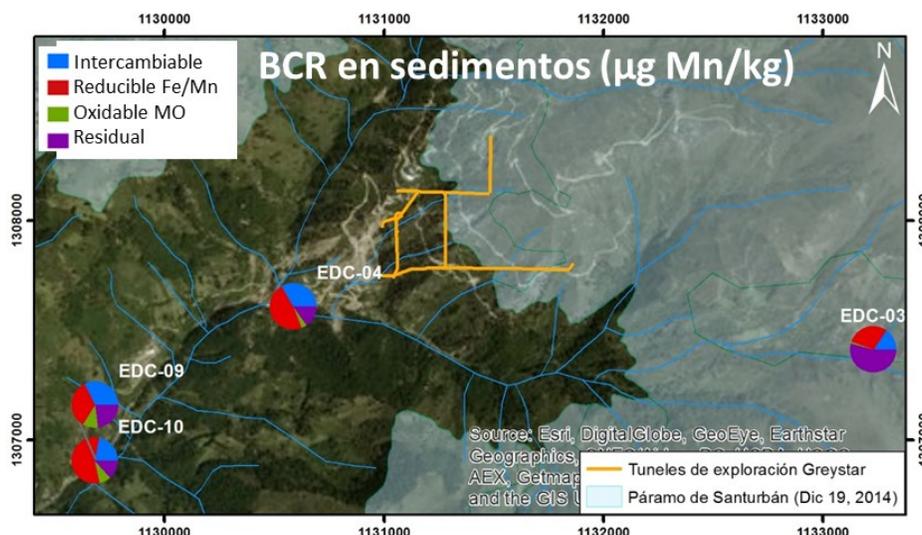


FIGURA 20. RESULTADOS DE EXTRACCIÓN SECUENCIAL (BCR) PARA MANGANESO EN SEDIMENTOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#### 5.2.4 Análisis de concentración de metales

Los metales analizados en las pruebas de laboratorio y campo fueron cobre, manganeso y bario, los tres relacionados con la actividad minera por su presencia en la tierra o su uso en esta actividad productiva.

##### 5.2.4.1 Cobre

El cobre es un contaminante del agua, las mediciones de laboratorio en la quebrada Páez en su parte alta y baja dieron las concentraciones más bajas (<0,01 mg Cu /L), pero a medida que se recorre la quebrada estas concentraciones aumentan hasta 0,19 mg Cu /L en la estación EDC-09 y 7,08 mg Cu /L en el drenaje de mina de en estación EDC-10, 7 veces por encima de la norma colombiana establecida por la Resolución 2115 del 2007 de 1 mg Cu /L.

Lo anterior debe estar asociado con la actividad minera, pues el valor más alto medido fue encontrado en la estación EDC-10 correspondiente al drenaje de mina que cae a la quebrada. Los valores reportados por el laboratorio son similares a los medidos en las pruebas de campo con el colorímetro, si bien en la estación EDC-10 el colorímetro marcó la mitad de lo indicado en las pruebas de laboratorio, ambos valores se encuentran encima de la norma colombiana mencionada anteriormente.

##### 5.2.4.2 Manganeso

El valor reportado por el laboratorio en la estación de línea base en el páramo (EDC-03) es <0,1 mg Mn/L y este mismo valor se reporta en la estación EDC-04. Estas concentraciones son similares a las mediciones hechas con el colorímetro en los mismos puntos y que resultaron en 0,003 y 0,031 mg Mn/L respectivamente.

Las pruebas de campo lo largo de las quebradas mostraron que las concentraciones aumentan paulatinamente hasta 0,474 mg/L, 158 veces más que la línea base y 4 veces más que el valor límite de la norma colombiana de 0,1mg/L establecido en la resolución

2115 del 2007. En la estación EDC-09 se midió en campo 0,294 mg Mn/L y en laboratorio 0,24 mg Mn/L, que son valores cercanos.

En el drenaje de mina en la estación EDC-10 se supera el límite de detección del equipo (de 0,7 mg Mn/L) en las pruebas de campo, mientras que el análisis de laboratorio arrojó un valor de 5,54 mg Mn/L, más de 50 veces encima de la norma. Las aguas ácidas de estos drenajes de mina movilizan el manganeso que se encuentra naturalmente en las rocas y lo incorporan al flujo de agua, a ello puede deberse los altos valores encontrados en el agua. El manganeso está relacionado generalmente con el hierro, es decir, con la pirita que es abundante en la zona.

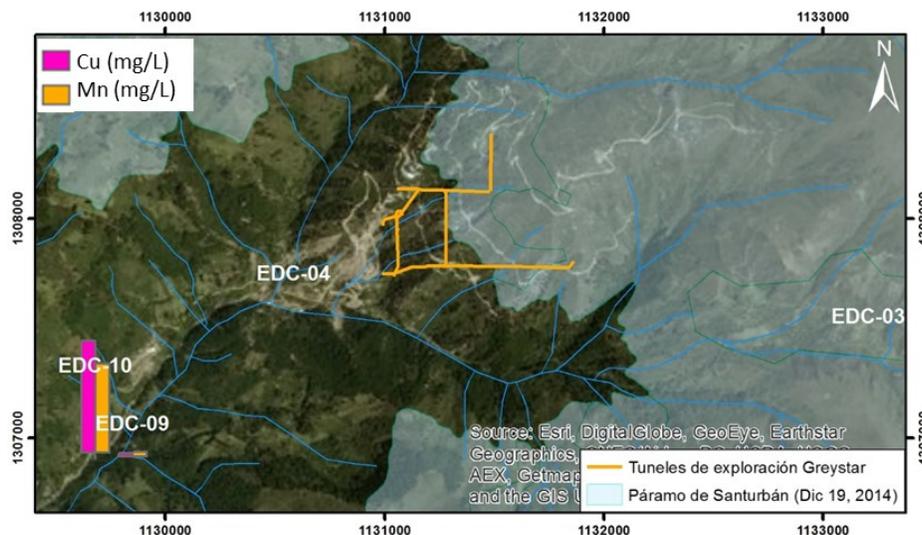


FIGURA 21. RESULTADOS DE PRESENCIA DE COBRE Y MANGANESO EN AGUA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 5.2.4.3 Bario

El bario es un metal encontrado naturalmente en las rocas y utilizado en procesos de perforación minera, por lo que es común en aguas circundantes a este tipo de proyectos. Las mediciones de campo realizadas con el colorímetro en el presente estudio no permiten identificar una tendencia en los valores de este elemento, aparece en altas concentraciones a lo largo del recorrido de la quebrada en diferentes puntos, pero también lo hace en la zona alta de la quebrada Páez donde no hay actividades productivas.

Los análisis de laboratorio muestran concentraciones menores a 0,141 mg Ba/L en todas las estaciones, menos en la EDC-04 cuyo valor es de 0,141 mg Ba/L, lo que puede indicar un error en el equipo de campo que detectó concentraciones altas (5 mg Ba/L) en la estación de referencia EDC-03 o a valores irregulares a lo largo de las quebradas.

### 5.2.5 Sulfatos

El sulfato es la sal que se genera a partir de la oxidación de la pirita. Es un compuesto abundante en la tierra que se libera de manera natural en el agua, sin embargo, puede darse también de manera acelerada por compuestos orgánicos que contienen azufre, como desechos industriales y drenajes de mina que tienen usualmente altas concentraciones de esta sal.

Los análisis de laboratorio muestran una baja concentración (32,6 mg SO<sub>4</sub><sup>-</sup>/L) de esta sal en la estación ubicada en la parte alta de la quebrada Páez en ecosistema de páramo EDC-03. Los valores aumentan a medida que se desciende por la quebrada alcanzando valores de 100,72 mg SO<sub>4</sub><sup>-</sup>/L en la estación EDC-04, 294,48 mg SO<sub>4</sub><sup>-</sup>/L en EDC-09 y 1249,66 mg SO<sub>4</sub><sup>-</sup>/L en la estación EDC-10 (correspondiente a un drenaje de mina), estas últimas 2 estaciones superan el límite indicado por la Resolución 2115 del 2007 de 250 mg SO<sub>4</sub><sup>-</sup>/L.

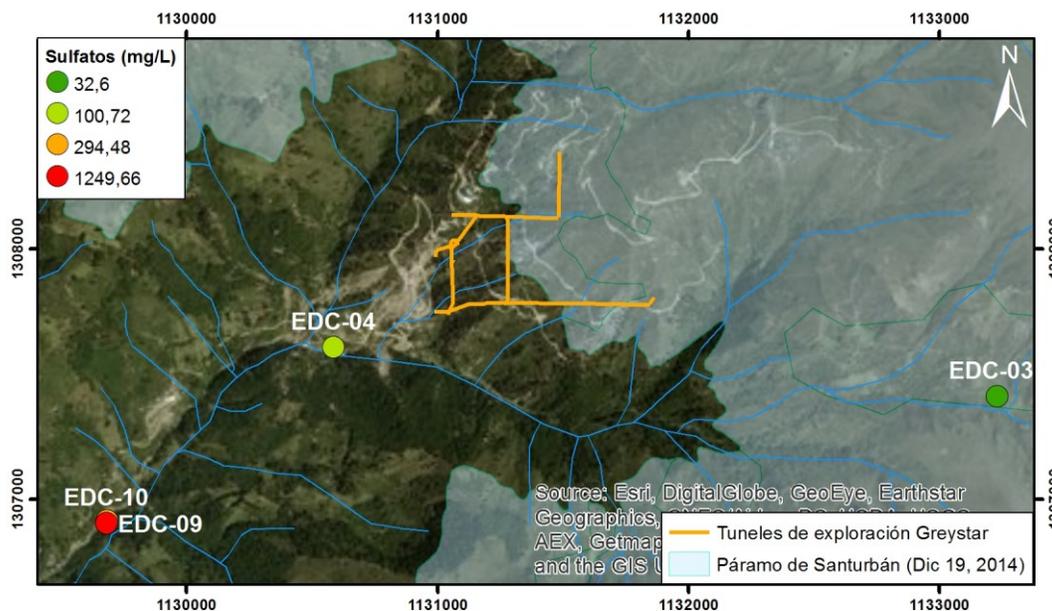


FIGURA 22. RESULTADOS DE PRESENCIA DE SULFATOS MEDIDOS EN AGUA  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Las mediciones de las pruebas de campo del colorímetro son consecuentes con las muestras de laboratorio: bajas concentraciones de sulfatos en zonas sin actividad humana como la cuenca alta de la quebrada Páez y la laguna de Páez y un aumento de la concentración a medida que se desciende por las quebradas y que se atraviesa la zona de actividad minera.

En la mayoría de las estaciones aguas abajo del páramo las concentraciones sobrepasan el límite de medición del equipo utilizado el cual es de 70 mg/L, lo que no permite establecer si se supera el valor de referencia de la norma colombiana en todos los puntos, pero sí es coherente con los valores reportados en las pruebas de laboratorio.

El único valor que no encuentra correspondencia entre las pruebas de campo y laboratorio es el reportado en la estación EDC-04, ambos están por debajo de la norma, pero hay una diferencia significativa entre los valores reportados.

### 5.2.6 Nitratos

La presencia de nitratos en aguas superficiales y subterráneas se da naturalmente por el ciclo del nitrógeno, sin embargo, esta concentración incrementa por el uso de abonos nitrogenados que son arrastrados por la lluvia e insumos como el explosivo ANFO utilizado en procesos mineros que impliquen voladura de roca (como la excavación de túneles). Los análisis de laboratorio muestran ausencia de este mineral en muestras de agua superficial en la estación EDC-03 y un incremento en las estaciones EDC-04 y EDC-09 (1,2 y 5,9 mg

$\text{NO}_3^-/\text{L}$  respectivamente). La muestra de la estación EDC-10 correspondiente a un drenaje de mina reportó el valor más alto de 12,61 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$ , por encima de la resolución 2115 del 2007 de la norma colombiana que establece el límite en 10 mg  $\text{NO}_3^-/\text{L}$ .

Frente a las pruebas de campo los valores monitoreados en las 11 estaciones se encuentran en el rango de las pruebas de laboratorio y son cercanos en las estaciones que se tomaron ambas mediciones (pruebas de campo y laboratorio) a excepción de la EDC-10, donde el equipo de campo no detectó la presencia de nitratos.

## 6. CONCLUSIONES

El yacimiento de Santurbán tiene la presencia de minerales potencialmente tóxicos que son detectables en las aguas como el uranio y el arsénico, con datos de uranio que sobrepasan casi tres veces los límites de la norma colombiana en las aguas de un drenaje minero. A partir de análisis cualitativo se detectaron además antimonio, bario, cadmio, cobre, manganeso, níquel, plomo, vanadio y zinc. Desde los estudios realizados por el Servicio Geológico en la década del 50 del siglo pasado se ha identificado la presencia de uranio en las rocas del páramo de Santurbán.

Son evidentes las afectaciones a la calidad de aguas superficiales relacionadas con la actividad minera. Las mediciones de conductividad eléctrica y la presencia de elementos como arsénico, mercurio, uranio, bario, manganeso, cobre, sulfatos y nitratos, los cuatro últimos por encima de lo establecido en la Resolución 2115 de 2007 en las estaciones ubicadas en las zonas mineras o aguas abajo contrastan dramáticamente con las mediciones en zonas no intervenidas por actividades humanas, donde la presencia de estos elementos es mínima o están ausentes.

La presencia natural de químicos tóxicos en conjunto con la alta concentración de piritas en las rocas del área puede dar lugar a la generación de toxicidad en los cuerpos de agua, lo cual debe llevar a plantear una prohibición de la minería en la cuenca pues la minería, particularmente de gran escala, puede causar acidificación por la disposición concentrada de desechos rocosos. La prohibición, en el marco del principio de precaución, puede operar hasta tanto se estudien en detalle estas consideraciones geoquímicas en el páramo de Santurbán.

A partir de los datos tomados en campo se encontraron medidas de pH entre 6,28 y 8,23 sin que presenten valores extremos por lo que no son un buen indicador para evaluar alteraciones en la calidad del agua en la zona de monitoreo. Los valores de conductividad eléctrica medidos se encuentran entre 25 y 1883  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , varían drásticamente entre las zonas no intervenidas como la laguna de Páez y el páramo y zonas intervenidas por actividad minera, por lo que la conductividad como parámetro de campo permite establecer y priorizar zonas de muestreo, siendo indicadores de cambios notorios de este parámetro.

Los datos de laboratorio muestran también excesos de cobre relacionados con drenajes y zonas mineras llegando a sobrepasar en 7 veces la norma colombiana. Similar situación presenta el manganeso, que sobrepasa en las zonas mineras 4 veces la norma y los sulfatos, una de las formas de contaminación de agua más común en las zonas mineras.

El colorímetro Hach DR900 permitió identificar de manera rápida, sencilla y ágil la concentración de algunos metales en el agua, siendo los sulfatos y el manganeso los que presentaron mayores valores, muchos de estos por encima de la norma colombiana

Resolución 2115 del 2007. Las pruebas de laboratorio evidenciaron también la presencia de uranio en la quebrada La Baja, con concentraciones superiores a la norma en un drenaje de mina. Debe tenerse en cuenta que las muestras y datos de campo tomados fueron tomados en fin de semana, cuando las minas se encontraban cerradas.

Los análisis de extracción secuencial mostraron como el zinc y plomo se encuentran en mayor proporción en la fracción residual, lo que indica una baja biodisponibilidad. El zinc muestra valores altos en su fase biodisponible en las zonas mineras y el cadmio se encuentra principalmente en la fase oxidable y secundariamente en la fase residual, lo que relaciona su biodisponibilidad al tipo de materia orgánica. El manganeso se encuentra principalmente en la fase reducible e intercambiable, esta es la más biodisponible y riesgosa por la facilidad para liberar este metal. En general los metales más biodisponibles son manganeso, magnesio, cadmio y zinc.

Las pruebas de especiación evidenciaron que el arsenito tiene mayor presencia en el agua y el arsenato en los sedimentos. Sin embargo, si se llegan a alcalinizar los sedimentos, el arsenato presente puede movilizarse y aumentar en el agua. En cuanto al mercurio, solamente se detectó mercurio total en las muestras de agua, mientras que en sedimentos predominaba el Hg (II) y no se detectó metilmercurio en ninguna de las muestras. Sin embargo, es recomendable medir este elemento en biota (peces o artrópodos) para descartar su presencia en el medio.

## 7. RECOMENDACIONES

- Es necesario que las autoridades ambientales y mineras pertinentes generen o soliciten a las empresas mineras presentes en el área generar estudios donde se caracterice geoquímicamente las rocas en las zonas mineralizadas y alrededores. Esta caracterización debe incluir como mínimo la identificación de metales pesados y elementos tóxicos como el arsénico y uranio.
- Es necesario que Eco Oro y Mubadala realicen muestreos de agua y sedimento en las zonas aledañas a sus zonas de exploración para tener mayor información sobre el deterioro de la calidad de agua producto de la actividad minera. Igualmente, las autoridades mineras y ambientales deben generar o garantizar que se genere esta información en las zonas afectadas por las minas de menor escala. Todo ello lleva a reiterar la necesidad, planteada por muchos investigadores y por la OCDE, de exigir licenciamiento ambiental a la etapa de exploración minera.
- Frente al uranio, se recomienda insistir a las autoridades ambientales y mineras que realicen estudios con mayor número de mediciones para poder caracterizar con mayor precisión la presencia de este elemento en la cuenca. Su presencia puede llevar a una restricción o prohibición de la minería si esta actividad lo libera, lo cual necesita mayores estudios, pero la presente investigación genera ya alertas.
- Una pregunta que surge, de manera obvia, es qué tipo de monitoreo y de control ambiental realiza la autoridad ambiental en la zona y si tiene una fortaleza suficiente para controlar la minería de pequeña y mediana escala y brindar a la comunidad confianza sobre el cuidado del agua en escenarios de exploración minera a gran escala.



---

## *AGRADECIMIENTOS.*

Se agradece a la comunidad de California por el apoyo y guía prestada en el desarrollo del presente proyecto y se recomienda seguir teniéndolos como apoyo fundamental en la planificación y realización de posteriores proyectos por su compromiso y conocimiento de la zona.