

MANUAL DE METODOLOGÍAS GEOQUÍMICAS DE PAÍSES IBEROAMERICANOS.

Información Geoquímica para la Sociedad.



ASGMI
Asociación de Servicios
de Geología y Minería
Iberoamericanos

MANUAL DE METODOLOGÍAS GEOQUÍMICAS DE PAÍSES IBEROAMERICANOS

Información Geoquímica para la Sociedad



Imagen: Muestreo geoquímico de suelos en el valle del Mantaro, provincia de Huancayo y departamento de Junín, Perú.



ASGMI
Asociación de Servicios
de Geología y Minería
Iberoamericanos

MANUAL DE METODOLOGÍAS GEOQUÍMICAS DE PAÍSES IBEROAMERICANOS.

Información geoquímica para la sociedad.

Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos.

ISBN: 978-84-09-52195-1

Depósito Legal: M-22461-2023

MANUAL DE METODOLOGÍAS GEOQUÍMICAS DE PAÍSES IBEROAMERICANOS

Información Geoquímica para la Sociedad

Editado por:

Maria João Batista (LNEG), Gloria Prieto Rincón (SGC), Andrea Turel (SEGEMAR), Iván Martín (IGME), Adrián Pérez (SGC)

Contribución (en orden alfabético):

Adrián Pérez (SGC), Andrea Turel (SEGEMAR), Cecilia Geisenblosen (DINAMIGE), César de la Cruz Poma (INGEMMET), Fernanda Andrade (IIGE), Francly Michele Medina (INHGEOMIN), Gloria Prieto Rincón (SGC), Iván Martín (IGME), João Larizzatti (CPRM), Juan Pablo Lacassie (SERNAGEOMIN), Joan Palau (ICGC), Karina Cerna (INHGEOMIN), Laura Cecilia Tristán Capetillo (SGM), Jessica Rivera Pérez (SGM), Luis Vargas Rodríguez (INGEMMET), Jorge Chira Fernández (INGEMMET), Maria João Batista (LNEG), Raynel Alberto Herrera Molina (IGP), Washington Castillo (IIGE).

Marzo, 2023

Prefacio

La Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos, ASGMI, es una organización sin ánimo de lucro de la que forman parte un total de 22 servicios geológicos de los países de América Latina y de la Península Ibérica. La Asociación tiene sus orígenes en la Declaración Conjunta de los Directores de los Servicios Geológicos asistentes a la III Reunión Latinoamericana de Ministros de Minería, en mayo de 1993 en Cochabamba (Bolivia) y adquiere personalidad jurídica propia y sede social permanente en diciembre de 2012, fecha en la que quedó inscrita en el Registro Nacional de Asociaciones de España.

La misión primordial de ASGMI es la contribución al desarrollo socioeconómico de los pueblos mediante la generación y difusión del conocimiento geocientífico del territorio, muy especialmente de los recursos geológicos de interés económico y de los procesos geológicos activos. De este modo, ASGMI se configura como una organización capaz de brindar conocimiento científico-técnico que da respuesta a la creciente sensibilidad social por aspectos tales como prevención y mitigación de los desastres naturales, el uso racional y sustentable de los recursos minerales y el agua subterránea, la prevención de la contaminación de suelos y agua como consecuencia de la actividad antrópica, o los efectos adversos del cambio climático.

La consecución de los fines de la Asociación se fundamenta en la cooperación horizontal entre sus miembros sobre el principio de confianza y respeto mutuo. Tal cooperación se lleva a cabo en dos ámbitos. Por una parte, las asambleas generales en las que los directores de los servicios geológicos iberoamericanos exponen sus respectivas líneas de acción y se sientan las bases para acuerdos específicos de cooperación que coadyuvan al fortalecimiento institucional; Por otra parte, los Grupos de Expertos que, a través de reuniones periódicas, intercambian experiencias, conocimientos y desarrollan proyectos propios de ASGMI, o colaboran en proyectos internacionales de investigación en los que participa ASGMI.

Recientes resultados tangibles de la encomiable labor de los Grupos de Expertos de ASGMI son, entre otros, la realización de mapas geológicos y temáticos regionales, incardinados en la Comisión de la Carta Geológica del Mundo, como son el Mapa Geológico de América del Sur y el Mapa Metalogenético de América Central y El Caribe. Asimismo, son destacables los desarrollos metodológicos que facilitan la homologación y correlación de datos, y la implementación de programas de trabajo de carácter sistemático, como son los relativos al inventariado y caracterización de Pasivos Ambientales Mineros, o la evaluación y puesta en valor del Patrimonio Geológico, documentos que pueden consultarse en www.asgmi.org.

En este contexto de cooperación internacional, el **Grupo de Expertos en Geoquímica -GEGEOQ-** de la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos -ASGMI- ha elaborado, mediante el intercambio de conocimientos y experiencias, este ***Manual de Metodologías Geoquímicas de Países Iberoamericanos, Información Geoquímica para la Sociedad***, con el objetivo básico de potenciar las capacidades operativas de los servicios geológicos miembros de la Asociación, contribuir a la capacitación profesional de sus jóvenes profesionales, y facilitar la implementación de programas de investigación geoquímica y su correlación internacional.

Desde estas líneas, la Junta Directiva de ASGMI expresa su agradecimiento a los miembros del Grupo de Expertos en Geoquímica -GEGEOQ- por la tarea realizada, muy especialmente a sus coordinadores, sin cuya dedicación y empeño no hubiera sido posible alcanzar este importante logro.

Vicente Gabaldon

Dedicación



El grupo de expertos en geoquímica de ASGMI dedica este manual a Gloria Prieto y Juan Locutura, quienes jugaron un papel importante tanto en la constitución de este grupo de geoquímica como en los primeros pasos de este manual, que ahora es de todos los que lo utilizan.

Sinopsis

La misión del Grupo de Expertos en Geoquímica (GEGEOQ) de la Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos ASGMI, es el intercambio de experiencias y metodologías en geoquímica, con el fin de desarrollar guías metodológicas y producir mapas temáticos que sean de utilidad para los países en los cuales los Servicios Geológicos brindan información para el servicio de la sociedad

El grupo de expertos fue creado formalmente en el año 2016, en reunión de la asociación realizada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en Chiapas, México y posteriormente se reactivó en el año 2019; fecha a partir de la cual sus reuniones han sido permanentes y se han convertido en un espacio de intercambio y análisis de experiencias en el tema de geoquímica y sus aplicaciones.

La tarea inicial del grupo estuvo dirigida a compilar el estado del conocimiento en geoquímica que tenía cada Servicio Geológico integrante de ASGMI y a la vez a incentivar la ejecución de proyectos geoquímicos en cada país. Adicionalmente el grupo estableció como meta a mediano plazo, la elaboración de un manual de metodologías geoquímicas multipropósito, el cual compendiará las experiencias en muestreo geoquímico y los avances en diferentes aplicaciones de la geoquímica en los países iberoamericanos.

Los Servicios Geológicos de ASGMI han aportado información y conocimiento para el cumplimiento de la meta que hoy se cumple, con la entrega del **Manual de Metodologías Geoquímicas de Países Iberoamericanos, Información Geoquímica para la Sociedad.**

La compilación del estado de avance del conocimiento geoquímico en los países pertenecientes a ASGMI, está resumida en el primer capítulo del manual.

En los siguientes capítulos se presentan las etapas requeridas para el desarrollo de campañas geoquímicas, desde la planificación, colecta de muestras, análisis de laboratorio, control de calidad de los datos, y finalmente se contempla el procesamiento de datos geoquímicos, incluyendo la nivelación de datos de diferentes campañas.

En los capítulos finales se desarrollan los temas de almacenamiento, disponibilidad de información y el archivo de muestras, las cuales son actividades muy importantes para la sostenibilidad de los estudios geoquímicos en cada país y su uso por la sociedad.

Los objetivos de este manual, al igual que los manuales producidos por otras organizaciones internacionales como el EGS - Geochemical Expert Group y la Comisión de la IUGS - Global Geochemical Baselines, es incentivar la armonización de los procedimientos para el muestreo geoquímico, los análisis químicos necesarios, el control de calidad analítico y homogenizar las etapas de un proyecto geoquímico, para su aplicación en prospección mineral, investigaciones geoambientales, en cartografía regional y en otras aplicaciones, en los territorios de América Latina y la Península Ibérica.

Este manual también tiene como objetivo brindar orientaciones para la implementación de proyectos geoquímicos en los países que tengan menor experiencia en levantamiento de información geoquímica en sus territorios.

Actualmente hacen parte del grupo GEGEOQ, representantes de los siguientes servicios geológicos: Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto de Geología y Paleontología de Cuba (IGP), Instituto de

Investigación Geológico y Energético de Ecuador (IIGE), Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Instituto Hondureño de Geología y Minas (INHGEOMIN), Servicio Geológico Mexicano (SGM), Instituto Geológico Minero y Metalúrgico do Perú (INGEMMET), Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Portugal (LNEG), y la Dirección Nacional de Minería y Geología de Uruguay (DINAMIGE).

Índice

Capítulo 1 - Introducción	4
1.1 Marco de Referencia.....	4
1.2 Panorama de la geoquímica en los Servicios Geológicos de Ibero-América	6
1.3 Historia de la geoquímica.....	12
Capítulo 2 – Planificación y muestreo.....	17
2.1. Planificación del muestreo.....	17
2.1.1 Planificación estratégica	17
2.1.2 Planificación del muestreo según el objetivo	18
2.1.3. Planificación y organización de una campaña de muestreo geoquímico.....	25
2.2 Medios y procedimientos de muestreo.....	44
2.2.1. Tipos de medios de muestreo.....	45
2.2.2. Procedimientos de toma de muestras.....	72
Colectar muestra de suelo profundo	88
Determinar pH del suelo.....	89
2.2.3 Gestión de las muestras.....	90
Capítulo 3 – Preparación física de muestras.....	91
3.1 Preparación física	92
3.2. Preparación de sedimentos y suelos	93
3.2.1. Preparación de sedimentos en el campo.....	93
3.2.2. Preparación de sedimentos y suelos en laboratorio	96
3.3. Preparación de muestras de llanuras de inundación y sedimentos de overbank	100
3.4. Preparación de muestras de concentrados de minerales pesados	100
3.5. Preparación de muestras de roca	102
3.6. Blancos de preparación física.....	108
3.7. Almacenamiento de las muestras y envío al laboratorio.	109
Capítulo 4 – Análisis químico y control de calidad.....	110
4.1. Introducción	110
4.2 Análisis de campo	110
4.2.1. Análisis fisicoquímico de aguas.....	110
4.2.2. Análisis químico de materiales geológicos sólidos mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)	112

4.3. Análisis químicos en laboratorio.....	114
4.3.1. Técnicas de descomposición de muestras.....	114
4.3.2. Métodos instrumentales de análisis.....	116
4.4. Aseguramiento de Calidad (QA) Y Control de Calidad (QC).....	121
4.4.1. Aseguramiento de la Calidad (QA).....	121
4.4.2. Control de la Calidad (QC).....	123
Capítulo 5 - Tratamiento estadístico de datos geoquímicos	129
5.1. Técnicas de <i>Leveling</i> en Cartografía Geoquímica Regional.....	130
5.2 Estadística Univariada.....	142
5.2.1 Medidas de tendencia central	143
5.2.2 Medidas de posición	145
5.2.3 Medidas de dispersión	146
5.2.4 Medidas de forma.....	148
5.2.5 Gráficos estadísticos	150
5.2.6. Tablas de resumen estadístico.....	155
5.3 Estadística Bivariada	156
5.3.1 Diagramas de dispersión.....	156
5.3.2 Covarianza (COV)	157
5.3.3 Regresión lineal.....	157
5.3.4 Correlación de Pearson.....	158
5.4 Estadística Multivariada.....	159
5.4.1 Análisis de factores (AF).....	160
5.4.2 Análisis de componentes principales (ACP).....	160
5.4.3 Análisis clúster	163
5.5 Estadística Predictiva	165
5.6 Determinación de parámetros geoquímicos y anomalías	167
5.6.1 Valor de fondo o background	168
5.6.2 Umbral geoquímico o threshold.....	168
5.6.3. Anomalías Geoquímicas.....	169
Capítulo 6 - Mapeo Geoquímico. Representación Cartográfica	172
6.1. Mapas unielementales ó univariados.	172
6.2 Mapas multielementales ó multivariados.	183
6.3 Interpolación de datos.....	187

Capítulo 7 - Informe geoquímico, gestión de la información geoquímica, almacenamiento y manejo de información.....	189
7.1. Informe geoquímico.....	189
7.1.1. Informe de exploración mineral	189
7.1.2. Informe de mapeo ó relevamiento regional.....	190
7.1.3. Informe de diagnóstico ambiental.....	191
7.2. Gestión de la información geoquímica, almacenamiento y manejo de información.....	191
7.2.1 Almacenamiento de información geoquímica.....	191
7.2.2 Carga de información.....	197
7.2.3 Manejo y repositorio de información geoquímica.	200
Bibliografía	206

Capítulo 1 - Introducción

1.1 Marco de Referencia

La *Geoquímica* como disciplina de las Geociencias relacionada con la investigación sobre el origen, dispersión, acumulación y procesos en que intervienen los elementos químicos en el medio natural, ha sido usada desde hace muchos años con diferentes propósitos, en proyectos cartográficos y aplicados de los Servicios Geológicos y en entidades geocientíficas de los diferentes países de Ibero América.

La información geoquímica ha sido utilizada tradicionalmente para prospección y exploración de recursos minerales y en años más recientes se ha constituido en base fundamental para estudios ambientales, así como también para definir líneas base geoquímicas necesarias para monitorear cambios en los territorios investigados.

La gran mayoría de Servicios Geológicos que conforman la Asociación de Servicios de Geología y Minería de Iberoamérica (ASGMI), han mantenido grupos de trabajo e investigación—que han generado información geoquímica para sus proyectos y programas; sin embargo, y aunque se ha tratado de levantamientos sistemáticos, las metodologías empleadas para generar la información geoquímica han sido diversas y no han correspondido a estándares homogéneos.

Ante la necesidad de estandarizar metodologías, compartir datos, avanzar en el conocimiento geoquímico de cada territorio y optimizar la utilización de información geoquímica con múltiples propósitos, se programó el Taller: “Geoquímica: Usos y Aplicaciones en los Servicios Geológicos”, el cual se desarrolló con el auspicio de ASGMI y fue organizado por el Servicio Geológico Mexicano, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en Chiapas, México, del 23 al 27 de febrero de 2016.

En la reunión de Chiapas, participantes de Argentina, Brasil, Colombia, Cuba, Ecuador, España, Guatemala, Honduras, Perú y México, ilustraron acerca de los usos y aplicaciones de la geoquímica en cada país: geoquímica ambiental, mapeo y cartografía geoquímica global, regional, nacional, y local; prospección y exploración regional y detallada de recursos minerales; geoquímica urbana; hidrogeoquímica; geoquímica médica y aplicaciones en metalogena y metalurgia.

Como conclusiones del taller, se resaltó que existe diferente grado de conocimiento geoquímico de cada territorio y se identificó la necesidad de incrementar ese conocimiento para su aplicación en recursos minerales, medio ambiente, salud, agricultura, entre otros. Se destacó la utilidad de los mapeos geoquímicos para producir atlas geoquímicos multipropósito a diferentes densidades de muestreo; la necesidad de aplicar y utilizar la información geoquímica para el desarrollo agrícola; y finalmente se reconoció la heterogeneidad y en algunos casos la ausencia de protocolos de muestreos (colecta, preparación, procesamiento) para la producción de información geoquímica en los diferentes países.

En la reunión se conformó un grupo de trabajo encargado de impulsar la elaboración de un manual para la adquisición de información geoquímica multipropósito, el cual estuvo constituido inicialmente por representantes de los Servicios Geológicos de Colombia, Argentina, España, y México y se acordó invitar a los directores de los Servicios Geológicos de Perú, Brasil, Chile y Portugal para participar en dicho grupo.

En sus inicios el grupo planteó como uno de sus objetivos, elaborar un Manual sobre Muestreo Geoquímico Multipropósito que fuera utilizable por los países pertenecientes a ASGMI, también se propuso organizar cursos y talleres de capacitación en geoquímica y sus aplicaciones, e impulsar el conocimiento geoquímico y sus aplicaciones en los países iberoamericanos.

En el proyecto de Mapeo Geoquímico Internacional (Proyectos 259 y 360 de UNESCO, Darnley et al., 1995) se evidenció que existían falencias en calidad, cantidad y cobertura de los datos geoquímicos existentes en el mundo, hecho que ha dificultado su utilización en reglamentaciones ambientales, en planes de desarrollo y en la búsqueda de recursos minerales.

En el caso de los países que pertenecen a la ASGMI, la situación ha sido similar, como se ha mencionado en párrafos anteriores, de tal modo que cada país dispone de datos geoquímicos de difícil utilización para análisis regionales que implican su integración en bases de datos únicas, dado que han sido producidos con diversas metodologías de muestreo y de análisis, y con distintos límites de detección (ppm o %), etc. Todo lo anterior hace que la información geoquímica obtenida durante muchos años, aunque muy valiosa para el conocimiento general del territorio de cada país, no tiene en la actualidad la calidad necesaria para establecer Líneas de Base Geoquímicas, para aplicarla al cuidado del ambiente y la salud humana, y tiene limitaciones para su uso en la búsqueda de nuevos yacimientos minerales y para elaborar planes de desarrollo, entre otras aplicaciones.

Las consideraciones anteriores, han sustentado que diversos países inicien programas de levantamiento geoquímico orientados a adquirir información geoquímica sistemática, multimedia y multipropósito para elaborar Atlas Geoquímicos Nacionales.

Para los países iberoamericanos del área de influencia de la ASGMI, es muy importante que la información geoquímica sea generada en programas geoquímicos sistemáticos, en los que se utilicen metodologías estandarizadas y actualizadas, para que los datos tengan plena utilización en la búsqueda de recursos del subsuelo (minerales), en planes de desarrollo y de salud, en programas de protección y legislación ambiental, en el establecimiento de líneas base geoquímica y de modelos geológicos. Para ello, es necesario el uso de metodologías actualizadas y estandarizadas que consideren muestreo multimedia, que se ejecuten mediante análisis químicos de alta calidad y con los mejores límites de detección y cuantificación disponibles, que se procesen los datos con metodologías que permitan aprovechar todo el potencial de este tipo de información, y que se produzcan mapas geoquímicos y temáticos que integren diversas capas de información georreferenciada.

La elaboración de un Manual o un documento sobre **“Cartografías Geoquímicas: Metodologías y Protocolos”** de la ASGMI, cumple con el objetivo principal de presentar conceptos, metodologías y protocolos básicos para que los países del ámbito de influencia de la asociación, planifiquen y ejecuten programas y proyectos de cartografía y mapeo geoquímico multipropósito, de tal modo que avancen en el conocimiento geoquímico de sus territorios, y optimicen y amplíen las aplicaciones de la información geoquímica.

En el contexto anterior, los integrantes del Grupo de Expertos en Geoquímica de los Servicios Geológicos pertenecientes a ASGMI (GEGEOQ) han aportado, datos, información, experticia y tiempo para producir el *Manual de Metodologías Geoquímicas de Países Iberoamericanos, Información Geoquímica para la Sociedad*.

1.2 Panorama de la geoquímica en los Servicios Geológicos de Ibero-América

Los países que componen la Asociación de Servicios Geológicos Mineros Iberoamericanos y que tienen representación en el Grupo de Geoquímica de ASGMI, en su mayoría tienen cubrimiento parcial de sus territorios con cartografía geoquímica con diferentes densidades de muestreo. Un cubrimiento del 100% de su territorio se ha alcanzado sólo en la Península Ibérica, con España y Portugal. Honduras, Ecuador y Argentina han alcanzado un 30 a 40% del territorio cubierto, Colombia el 85%, mientras que Cuba y Perú han alcanzado un 77%.

Para conocer el estado de avance del cubrimiento geoquímico en los países iberoamericanos se elaboró una encuesta, en la cual los diferentes países aportaron información, cuyos datos se resumen en la Tabla 1 y se presentan en los siguientes párrafos.

De la encuesta realizada se pudo deducir que la mayoría de los países han logrado una cobertura en escala regional cuyos objetivos han sido diversos, han utilizado diferentes medios de muestreo y variados métodos analíticos para la obtención de los datos; situación que no ha permitido obtener un mapa geoquímico de la totalidad del área muestreada. Cartografía geoquímica en escala nacional para identificar, por ejemplo, niveles de línea de base geoquímica, se encuentra avanzada en Colombia, España, Portugal, México y Perú y se está avanzando en Brasil y Argentina.

A continuación (Tabla 1.1), se ilustra la cobertura en cartografía geoquímica alcanzada por cada país hasta la fecha, y se registran las densidades de muestreo de estos programas geoquímicos.

Tabla 1.1. Cobertura de mapeo geoquímico de cada país

Servicio Geológico	¿Qué cobertura de Cartografía Geoquímica posee su país?
SEGEMAR, Argentina	Participa en el programa de Cartografía Geoquímica Global con 1 muestra/6400 km ² (celdas 80km x 80km), el cual está iniciando; cobertura en escala regional del 30% del territorio con 1 muestra/20 km ² ; cobertura en escala nacional del 11% con 1 muestra/400 km ² .
SGB/CPRM, Brasil	Participa en el programa de Cartografía Geoquímica Global 7,3 % del territorio con 1 muestra/2.600 km ² ; cobertura nacional 6,2 % del territorio con 1 muestra/140 km ² ; cobertura regional 22,7% del territorio con 1 muestra/45 km ² ; y cobertura local 2,3% del territorio 1 muestra/2-6 km ² .
SGC, Colombia	Participa en el programa de Cartografía Geoquímica Global con cobertura del 80% del territorio y densidad de 1/6400 km ² (celdas 80x80 km) y 1muestra/1600 km ² (celdas 40x40 km ²), cobertura nacional del 50% con 1muestra/25 km ² ; (celdas 5x5km), y en escala regional el 30% del territorio a diversas densidades y local 16% con 1 muestra/4km ² (celdas 2x2 km).
IGCP, Cuba	Ha cubierto cerca del 50% del territorio con muestreo regional con densidad de 4 a 6 muestras/km ²
IIGE, Ecuador	Ha alcanzado una cobertura nacional del 30% del territorio con una densidad de muestreo de 1muestra/2.50 km ² y una cobertura regional de cerca del 30% a varias densidades de muestreo.
IGME, España	Participa en el programa de Cartografía Geoquímica de Europa (Global) y presenta cobertura nacional total (100%) de su territorio con una densidad de 1muestra/20 km ² .
INHGEOMIN, Honduras	Presenta una cobertura del 32,8% del territorio con varias densidades de muestreo.

SGM, México	Participa en el programa de Cartografía Geoquímica Global con densidad de 1muestra/35 km ² y una cobertura nacional con una densidad de 1muestra/5,5 km ² .							
INGEMMET, Perú	Participa en el programa de Cartografía Geoquímica Global con cobertura del 77% y densidad de 1muestra/80 km ² , con cobertura nacional del 65% con 1muestra/10 km ² , y cobertura regional del 65% con diversas densidades.							
DINAMIGE, Uruguay	Presenta una cobertura regional de 13.2 % del territorio con una densidad de entre 1 a 4 muestras por km ²							
LNEG Portugal	Participa en el programa de Cartografía Geoquímica de Europa (Global), cobertura nacional total (100%) del territorio con una densidad de 1muestra/625 km ² , y cartografía regional multipropósito con diversas escalas y con cubrimiento del 50% de su territorio.							
Servicio Geológico	% Cobertura* (%)				Densidad* (muestra/ km²)			
	Global (>1000 km ²)	Nacional (100-1000 km ²)	Regional (10-100km ²)	Local (1-10 km ²)	Global (>1000 km ²)	Nacional (100-1000 km ²)	Regional (10-100km ²)	Local (1-10 km ²)
SEGEMAR, Argentina		11	30		1/6400	1/400	1/20	
SGB/CPRM, Brasil	7,3	6,2	22,7	2,3	1/2600	1/140	1/15	1/2-6
Chile		26					1/20	
SGC, Colombia	80	50%	30	16	(80x80) 1/6400 y (40x40) 1/1600	1/9 1/16 1/25	1/4 1/9	1/1 1/4
IGCP, Cuba			50					4 a 6/ 1
IIGE, Ecuador			30					1/2.5
IGME, España	100		100		1/4700		1/20	variable
INHGEOMIN, Honduras			32,8				variable	
SGM, México	100		100	46.36	(40x40) 1/1600	1/35		1/5,5
INGEMMET, Perú	77		65		1/6400		1/15	
DINAMIGE, Uruguay			13.2				1/1, 4/1	

LNEG Portugal	100	100	40		1/4700	1/625		variable
Uruguay			13.2				1/4	

*** Con base en la literatura disponible sobre mapeo y cartografía geoquímica, se acordó clasificar la cobertura del territorio en % y la densidad de muestreo en cantidad de muestras/km², haciendo referencia a escala global, nacional, regional y local. Se agruparon intervalos de área global, nacional, regional y local, independientemente de que en algunos países se utilice la terminología “nacional” para aquella escala que en la tabla presentada se considera como escala regional o local.**

La Cartografía Geoquímica en los Servicios Geológicos de Portugal y España es producida tanto por los propios Servicios Geológicos como por empresas o Universidades. En el caso de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador, México y Perú, la cartografía sistemática es producida únicamente por los Servicios Geológicos. En el caso de Cuba, esta cartografía es producida solamente por empresas y en el caso de Honduras es generada por un organismo internacional.

Con respecto a la existencia actual de programas de Cartografía Geoquímica sistemática España, Brasil, Colombia y Argentina tienen actualmente programas de cartografía geoquímica que siguen los protocolos de FOREGS y UNESCO; Ecuador, Argentina, Perú y México tienen programas de cartografía geoquímica con protocolos internos de cada una de las instituciones; y Honduras, Cuba y Portugal no tienen un programa de cartografía geoquímica sistemática en este momento. En Portugal existe una cobertura con muestreo de suelos y sedimentos en un programa geoquímico adelantado en la década de 1990 que siguió las recomendaciones del proyecto UNESCO IGCP 259 (Bjorklund, A., 1992), el cual abarcó todo el territorio continental de Portugal y tiene datos de pequeñas campañas de mapeo geoquímico asociadas con proyectos de prospección de minerales. Cuba está preparando un programa nacional de mapeo geoquímico multipropósito con una metodología única basada en ejemplos y experiencia de programas internacionales como FOREGS (Salminen et al., 2005; De Vos et al., 2006), GEMAS (Reimann, et al., 2014a, 2014b) e IGCP 259 (Bjorklund, 1992).

Los medios de muestreo más comunes empleados en los programas geoquímicos de los Servicios Geológicos para sus programas geoquímicos son sedimentos de corriente, sedimentos de llanura de inundación (floodplain y overbank), suelos, rocas y aguas superficiales. Cuba, Portugal, Brasil, Colombia, España y México utilizan todos estos medios en sus estudios geoquímicos. Argentina utiliza principalmente sedimentos de corriente, Ecuador, sedimentos, rocas y agua superficial. Honduras rocas y Perú ha utilizado múltiples medios de muestreo.

En el Servicio Geológico de Cuba se realizan todos los análisis químicos de las muestras colectadas en sus programas, mientras que en los Servicios Geológicos de Colombia, Portugal, Ecuador, Brasil, Perú y México las muestras también se analizan en laboratorios comerciales y en laboratorios de investigación. En el caso de Portugal, las muestras de rutina van al laboratorio comercial, si son muestras especiales se hacen en el Servicio o en las Universidades. En los Servicios Geológicos de España, Honduras y Argentina, todas las muestras se analizan en laboratorios comerciales. En el caso de Colombia las muestras de línea base geoquímica global se analizan en Convenio con el Servicio Geológico de China en los laboratorios del IGGE en China y otros análisis de otros programas se analizan en laboratorios del Servicio.

A continuación (Tabla 1.2), se presentan los principales controles para garantizar la calidad de los datos geoquímicos llevados a cabo en cada servicio geológico.

Tabla 1.2. Control de calidad de datos geoquímicos en los servicios geológicos.

Servicio Geológico	¿Cómo realiza el control de calidad analítica en los proyectos de cartografía geoquímica?			
	Patrones		Duplicados campo/Duplicados de laboratorio	
	Internacionales	Internos	Duplicado de campo	Duplicado de Laboratorio
SEGEMAR, Argentina	1 muestra patrón cada 20 muestras		1 duplicado cada 20 muestras	1 duplicado cada 20 muestras
SGB/CPRM, Brasil	1 muestra patrón (MRC) cada 20 muestras		1 duplicado cada 20 muestras	1 duplicado cada 20 muestras
SERNAGEOMIN (Chile)	Estándar Internacional Certificado STSD-3 (Canadá)	ninguno	1 cada 20 muestras (5%)	1 cada 20 muestras (5%)
SGC, Colombia	Estándares internacionales certificados, según estándar.		1 duplicado cada 10 muestras	1 duplicado de preparación, y 1 duplicado de análisis cada 10 muestras. 1 blanco de muestras y 1 blanco de reactivos cada 10 muestras.
IGCP, Cuba	No reportado	No reportado	No reportado	No reportado
IIGE, Ecuador			Duplicados de campo	Duplicados de Laboratorio
IGME, España	Duplicados siempre que es posible	Duplicados siempre que es posible	Duplicados siempre (un 5% aprox.)	Duplicados siempre (un 5% aprox.)
INHGEOMIN, Honduras	No reportado	No reportado	No reportado	No reportado
SGM, México	Pruebas internacionales con SGS (LQSI en EUA y ANALAB en Australia) y con GEOSTATS PTY (Australia).	El SGM cuenta con dos Centros Experimentales, certificados en la norma ISO 9001 desde 1998 y acreditados ante la EMA en la norma ISO/IEC-17 025 (Oaxaca en 2012 y Chihuahua, 2016).	Duplicados de campo	1 duplicado seleccionado en forma aleatoria cada 12 muestras.
INGEMMET, Perú	Estándares internacionales certificados.		1 duplicado cada 30 muestras.	1 duplicado cada 20 muestras
DINAMIGE, Uruguay	Materiales de referencia certificados de matriz similar a la muestras de estudio.	No reportado	No reportado	1 Duplicado de preparación cada 10 muestras
LNEG Portugal	Patrones internacionales de roca	Patrones de muestras para las cuales ya existen resultados anteriores. Se está adquiriendo buena cantidad de una muestra para patrón interno.	Duplicados siempre y con porcentajes variables	Duplicados siempre y de acuerdo con los estándares de los laboratorios.

Los objetivos de la Cartografía Geoquímica en todos los países están orientados a investigaciones ambientales y a prospección mineral, con excepción de Cuba, en donde el objetivo es específicamente la prospección de minerales. La mayoría de los Servicios Geológicos tienen equipos de prospección geoquímica propios con excepción de Honduras y Cuba.

La información geoquímica está disponible para Instituciones externas a los Servicios Geológicos y al público en general en casi todos los Servicios Geológicos, excepto en Honduras y Ecuador. En el caso de España y Portugal se provee la información previa solicitud y en el caso de Portugal se debe realizar pago previo para solicitudes de empresas.

Los Servicios Geológicos disponen de información en formato digital y analógico, aunque en el caso de Ecuador solo está en formato digital y en el caso de Colombia el formato es digital para toda la información y solo la información histórica tiene respaldo analógico. Todos los Servicios Geológicos tienen información geoquímica tanto en formato raster de imagen como en formato gdb de base de datos georreferenciada.

Todos los Servicios Geológicos reportan que la información geoquímica es solicitada por universidades, compañías mineras, entidades estatales y público en general.

Las líneas de investigación en geoquímica que adelantan los diferentes servicios geológicos se presentan en la tabla siguiente (Tabla 1.3).

Tabla 1.3. Líneas de investigación en geoquímica desarrolladas en cada Servicio Geológico

Servicio Geológico	Líneas de investigación en geoquímica desarrolladas
SEGEMAR, Argentina	<ol style="list-style-type: none"> 1. Relevamiento geoquímico sistemático de sedimentos de corriente en todo el territorio nacional. Multipropósito. Densidad de muestreo promedio: 1/20 km² y 1/400 km² 2. Muestreo geoquímico de sedimentos de corriente y suelos para Estudios Geoambientales en áreas específicas (Línea de investigación recientemente iniciada) 3. Mapas geoquímicos de compilación de la información generada durante los Planes de Exploración Geológico- Minera (Cu, Pb, Zn) en las décadas del '70 y '80. 4. Inicio del mapeo de Línea de Base Geoquímica Global (grilla 80km x 80km)
SGB/CPRM, Brasil	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mapeamento geoquímico multiuso a escala nacional 2. Mapeamento geoquímico regional 3. Mapeamento geoquímico e atlas geoquímicos das províncias minerais do Brasil 4. Estudos orientativos para exploração de bens minerais estratégicos 5. Geologia médica e geoquímica ambiental
SGC, Colombia	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mapa geoquímico del mundo, muestro de Ultra Baja Densidad (Geoquímica aplicada) multipropósito. 2. Mapeo Geoquímico regional para mapa geoquímico de Colombia y Atlas Geoquímico de Colombia, multipropósito 3. Exploración geoquímica de minerales a escala regional y local. 4. Geoquímica Medica y Ambiental (Geomedicina: Mercurio en Carbones, Procesos

	<p>geoquímicos de arsénico y otros elementos potencialmente peligrosos en zonas de interés y su incidencia en salud)</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Investigaciones en geoquímica y depósitos minerales. 6. Huella digital de minerales - Prioridad en oro.
IGCP, Cuba	<p>En la actualidad se trabaja en crear condiciones para la realización futura de un levantamiento geoquímico nacional multipropósito que siga una metodología única actualizada. Como parte de ello, en 2016 se preparó un documento metodológico sobre el levantamiento geoquímico a escalas medias basado en la experiencia internacional, incluida la del FOREGS, el GEMAS, las recomendaciones del proyecto IGCP-UNESCO 259 y la obtenida por diversos Servicios Geológicos de Iberoamérica y otros países.</p>
IIGE, Ecuador	<p>El objetivo es completar con datos de geoquímica de sedimentos fluviales y rocas en la totalidad del país para:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cartografía Geoquímica aplicada a determinación de ocurrencias minerales 2. Generación de línea base geoquímica. 3. Generación de base de datos de muestreo hidrogeoquímico en zonas de actividad minera con fines ambientales
IGME, España	<ol style="list-style-type: none"> 1. La actividad geoquímica actual del IGME se centra fundamentalmente en la Cartografía Geoquímica para fines medioambientales con proyectos a escala autonómica para definición de líneas de base, o para la realización de cartografía geoquímica en los distintos dominios geológicos de la península Ibérica. 2. 2. Proyectos enfocados en la caracterización geoquímica y exploración minera en zonas con interés, actualmente se llevan a cabo proyectos en la Faja Pirítica Ibérica y en la zona de Ossa Morena. 3. 3. Estudios geoquímicos de elementos de las zonas costeras del litoral español para tener un conocimiento medioambiental de las mismas.
INHGEOMIN, Honduras	<p>Actualmente no hay líneas de investigación específicas en geoquímica</p>
SGM, México	<p>Cartografía Geoquímica en paralelo a la cartografía geológico-minera escala 1:50.000.</p>
INGEMMET, Perú	<p>Geoquímica global de suelos, esta investigación forma parte del proyecto auspiciado por UNESCO, liderado por el Servicio Geológico de China (CGS); tiene como objetivo elaborar la Carta Geoquímica de suelos a nivel mundial. Para esto, se ha dispuesto una malla de muestreo de 80 km x 80 km, en el que se contempla la recolección de suelos superficiales y profundos, con el propósito de obtener una base de datos estandarizada de libre acceso.</p>
DINAMIGE, Uruguay	<ol style="list-style-type: none"> 1. Relevamiento Geoquímico de Reservas Mineras Tipo de muestra: rocas, planicie de inundación, lecho vivo y concentrado de batea. 2. Geoquímica Ambiental. Estudio de Nivel basal de fósforo en cuenta media-alta de Rio Negro 3. Litogeoquímica. Análisis de rocas para su caracterización geoquímica. Parte de proyectos de cartografía. 4. Hidrogeoquímica de aguas subterráneas. Enfoque en elementos nocivos para la salud

LNEG Portugal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prospección geoquímica en áreas mineras conocidas (suelos, sedimentos de corriente y rocas en sondeos o afloramientos); 2. Cartografía geoquímica digital con información histórica del Instituto y de las empresas; 3. Estudios ambientales en áreas potencialmente contaminadas; 4. Estudios específicos de geoquímica para detección de mineralizaciones profundas.
---------------	--

Como se describe en la Tabla 1.3, con excepción de Honduras, todos los países trabajan activamente en proyectos específicos de Geoquímica.

Argentina, Colombia, Ecuador, España, México y Perú desarrollan actualmente programas de cartografía geoquímica de alcance regional. En Argentina, Brasil Cuba, Ecuador y Perú se planea iniciar actividades para el mapeo regional futuro utilizando referencias internacionales. Portugal desarrolla actividades de mapeo geoquímico asociadas con recursos minerales en zonas localizadas y el mapeo regional se realiza a partir de información geoquímica de archivo obtenida en programas anteriores.

La información geoquímica podría servir como punto de partida para la compilación de datos y la armonización de la información para la futura elaboración del mapa geoquímico de América Latina.

1.3 Historia de la geoquímica

La **Geoquímica** es la ciencia que se centra en el estudio de la cantidad de elementos químicos componentes de los materiales naturales existentes en diversos contextos espaciales y geológicos, y también investiga los procesos que explican y controlan la distribución de los elementos en el medio natural. La Geoquímica ha abordado aspectos como los contenidos medios de elementos químicos en la corteza terrestre (Clarke, 1924), contenidos en las grandes familias de rocas (Vinogradov, 1962, Turekian e Wedepohl, 1961), y la composición química de diversos materiales naturales (rocas, suelos, aguas, sedimentos de corriente, gases, plantas, etc.), en diversos contextos geográficos y geológicos (Wedepohl, 1969). La caracterización geoquímica de materiales naturales en varios geoambientes se ha efectuado a diferentes escalas, desde la cósmica en las grandes unidades del geoide terrestre hasta entornos concretos de la superficie de la tierra. Estos estudios se iniciaron y desarrollaron, a partir de finales del siglo XIX en los países escandinavos del Norte de Europa (Rankama y Sahama, 1950) y se intensificaron en los primeros decenios del siglo XX, en la URSS, con figuras como las de Fersman o Vernadsky.

La **exploración geoquímica aplicada a la exploración minera** tuvo su origen a mediados de los años 1930s (Hawkes and Webb, 1962) en la URSS donde la investigación fundamental sobre la distribución geoquímica de elementos en diversos materiales y contextos sentó las bases de la prospección geoquímica. A finales de la Segunda Guerra Mundial y motivado por la gran necesidad de metales para la reconstrucción industrial (Plant et al, 1988) se incrementó la búsqueda de nuevas herramientas de exploración lo que condujo a la aplicación práctica y definitiva, de los conocimientos teóricos fruto de la investigación geoquímica en la URSS, a la prospección de nuevos yacimientos minerales. En dicha investigación previa, se había puesto de manifiesto que los contenidos geoquímicos eran generalmente más elevados, en el caso de muchos elementos químicos, en la proximidad de los yacimientos minerales, que lejos de ellos, lo cual era válido para muestras procedentes de diversos medios de muestreo. La aplicación de este conocimiento teórico a la búsqueda de yacimientos fue llevada a cabo en Tennessee por Lakin (Hawkes et al, 1949), quien descubrió una mineralización de Zn tomando muestras de suelos dispuestas según una malla, para su análisis sistemático de los contenidos de Zn. Lo anterior significó el

inicio de una aplicación creciente y un desarrollo continuo de prospecciones que emplearon suelos, sedimentos de corriente, aguas y más tarde rocas (litogeoquímica), que mostraron su eficacia, y al mismo tiempo se refinaron las técnicas y métodos utilizados, tanto en la toma de muestras como en la preparación y en los análisis químicos necesarios. Las campañas geoquímicas de exploración y las técnicas y métodos geoquímicos pasaron a constituirse en una herramienta insustituible para la exploración mineral. Este desarrollo se hizo, además, en contextos, climas, y entornos geográficos muy diversos, lo cual contribuyó a un gran desarrollo y a una mejora técnica y metodológica en el campo de la geoquímica.

Dos grandes avances tecnológicos representados en los desarrollos en técnicas instrumentales analíticas multi-elementales (ICP-AES, ICP-MS y fluorescencia de Rayos X), y en avances de microinformática (eclosión del PC y de software específico de tratamiento estadístico y gráfico), posibilitaron el lanzamiento de programas de exploración geoquímica sistemática multi-elemental, aplicados a grandes áreas (estratégicos) tanto de reconocimiento como de ámbito regional.

Algunas de las campañas de reconocimiento han supuesto hitos en la historia de las campañas geoquímicas como es el caso de la realizada en Sierra Leona en 1967 (Garrett, and Nichol, 1967) y Zambia (Armour-Brown and Nichol, 1970). Estos programas geoquímicos sirvieron para demostrar que las campañas de reconocimiento con menor densidad de muestreo y de carácter multi-elemental, permitían reconocer patrones de dispersión coherentes con los rasgos geológicos. Meyer, W. et al. (1979) señalan, sin embargo, que las campañas de sedimentos de corriente de baja densidad, con espaciado amplio entre muestras, son útiles para la detección de provincias metalogénicas en zonas relativamente inexploradas, y han demostrado constituir un método eficaz para la delineación de regiones amplias con potencialidad mineral, pero que este tipo de campañas no identifican, salvo en casos raros, áreas discretas de mineralización. El carácter multi-elemental de los análisis es, en este caso, obligado, porque maximiza la utilidad de estas muestras obtenidas con un costo muy elevado.

Ya en la década de los 1970 empieza a producirse un cambio que acabaría por manifestarse con mayor intensidad en los 1980s en las sociedades de los países más industrializados representado en considerar el estado de los ecosistemas, producido por las evidencias de su deterioro progresivo. El fuerte desarrollo de la actividad industrial subsiguiente a la segunda guerra mundial se traduce en procesos de contaminación progresiva de las aguas superficiales y subterráneas, y también de los suelos y de la atmósfera. Esta inquietud creciente experimentó un incremento más radical, por la coincidencia, a finales de la década de los años 1980, de varios eventos que produjeron una aceleración e intensificación de los efectos de degradación de los ecosistemas, en forma muy significativa.

Accidente del reactor nuclear de Chernobyl (1986), como consecuencia del cual, además de las grandes pérdidas humanas y de las graves consecuencias sanitarias, se produjo una lluvia de isótopos radioactivos de vida media a larga que (^{90}Sr y ^{137}Cs) cuya nube se desplazó hacia el Oeste, encontrándose aún hoy anomalías de dichos isótopos en zonas de Escocia.

Erupción del volcán Pinatubo, en Filipinas, en 1991. Este volcán liberó a la atmósfera enormes volúmenes de materiales piroclásticos y de gases como CO_2 y SO_2 , que se expandieron por todo el planeta y fueron la causa de un incremento significativo de efecto invernadero y de lluvia ácida. Asimismo, se liberaron miles de toneladas de metales pesados (Cu, Pb, Zn, Hg, etc.) y de S, cuyas suspensiones se dispersaron por grandes sectores de la superficie de la tierra.

La lluvia ácida relacionada con la combustión masiva e insuficientemente controlada de combustibles fósiles en las centrales térmicas del Este y Centro de Europa alcanzó en aquellos años un gran crecimiento, que se tradujo en la agresión manifiesta y, en algunas áreas, de la destrucción de gran parte de la masa

forestal centro europea causado por la lluvia acidificada por la combinación de emisiones de SO₂ con el vapor de agua.

La coincidencia, en aquella década, de estos eventos que tuvieron alcance a escala global dieron origen de numerosos intentos por monitorear y valorar los graves efectos producidos en él. Se pensó en la posibilidad de utilizar, para ello, la inmensa cantidad de datos geoquímicos generados en los años anteriores en las numerosas campañas de exploración geoquímica llevadas a cabo por empresas mineras y en las de exploración regional de los Servicios Geológicos.

La importancia del Mapeo Geoquímico fue puesta de relieve por H.E. Hawkes y J.S. Webb en su clásico libro “Geochemistry in Mineral Exploration” en 1962. En 1973 J.S. Webb et al. publicaron el primer atlas geoquímico: “Provisional Geochemical Atlas of Northern Ireland”, y desde entonces se iniciaron sucesivamente más de 50 proyectos de mapeo geoquímico regionales, nacionales e internacionales; hacia finales de los años '80 y con la experiencia de décadas, se comenzaron a visualizar algunas limitaciones como la inconsistencia de los elementos mapeados entre Programas, la falta de información geoquímica debido a los altos límites de detección y la imposibilidad de poder comparar los resultados de los distintos levantamientos geoquímicos: tal situación condujo al inicio del “International Geochemical Mapping Project (IGMP259)” bajo el auspicio de la “UNESCO’s International Geological Correlation Program (IGCP)” en 1988.

La Exploración Geoquímica basada en el concepto de *patrones de dispersión* a partir de un punto- fuente había madurado durante los últimos 50 años y dió lugar a estudios para determinar patrones más amplios, los *patrones de distribución*, sus principios básicos, las nuevas metodologías de investigación y su relación con la exploración minera, además de su proyección y aplicaciones ambientales.

La estandarización de la metodología de mapeo geoquímico y el estudio de la viabilidad de un muestreo de *amplio-espaciado global* en alrededor de 5000 celdas GRN (Geochemical Reference Network) con una cobertura de la totalidad de la superficie terrestre, fueron los objetivos planteados para obtener una visión global de la distribución geoquímica de 71 elementos químicos. La publicación de la Unesco titulada “A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management” (Darnley et al., 1995), fue el resultado de esta iniciativa que se plasmó en 1997 como finalización del IGCP Project 360 “Global Geochemical Baseline”. A partir de entonces, el mapeo geoquímico de baja densidad se adelanta internacionalmente desde la “Commission on Global Geochemical Baselines (CGGB)” con el auspicio de la IUGS que acaba de publicar el manual de metodologías geoquímicas (Demetriades et al., 2022).

Es pertinente mencionar el aporte en este proceso, del “National Geochemical Mapping Project de China”, y el Programa de levantamiento Geoquímico Regional (RGNR) iniciado en 1979, cuya implementación y responsabilidad técnica estuvo a cargo del *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration (IGGE)*. Este amplio programa, contribuyó con el desarrollo de técnicas de muestreo para distintas regiones geográficas, con diversos esquemas analíticos multielemento (39 elementos químicos), profundizó el estudio y uso de muestras standard de referencia y la conveniencia de la realización de estudios geoquímicos de orientación. La amplia cobertura areal (más de 6 millones de km²) con muestras de sedimentos de corriente es registrado como uno de los proyectos de mapeo geoquímico más exitosos en el mundo, por su contribución al descubrimiento de depósitos minerales, y por haber realizado un gran aporte en la obtención de datos consistentes, completos y comparables a escala global. Tales contribuciones lideradas por el Profesor Xie Xuejing fueron aceptadas para el informe final del IGCP259.

A partir del desarrollo del Proyecto EGMON (Environmental Geochemical Monitoring Network 1992-1995) en China (Xuejing et al., 1997), se destacó la importancia de las muestras de floodplain sediment (FS) (llanura de inundación), en el marco de la definición de “*Large- basin Uni-sample Approach*” (1000- 6000 km²), como medio de muestreo para obtener (1) una *rápida visión geoquímica global* a bajo costo y en

corto tiempo, conclusión alcanzada después de comparar 529 muestras de FS con millones de muestras de sedimento de corriente del Programa RGNR y comprobar la correspondencia de la distribución entre ambos programas; (2) para monitoreo ambiental a través del cociente de los datos de superficie/profundidad y (3) para definir “bloques geoquímicos de la corteza terrestre (>1000 km²)”, como estrategia para la búsqueda de grandes depósitos minerales.

Sin duda, una gran contribución de estos programas fue el requerimiento analítico de que los límites de detección de las determinaciones debían estar por debajo de las concentraciones más bajas de la corteza terrestre para ser *globalmente comparables*. En concordancia con lo anterior, el esquema para análisis geoquímicos adoptado en los laboratorios del IGGE en Langfang China, fue paralelo a las discusiones que sobre este tema se llevó a cabo en aquellos años, por parte de los programas de levantamiento geoquímico como el Forum of European Geological Surveys (FOREGS).

En años siguientes, diversos *Atlas Geoquímicos de Línea de Base a Escala Global* fueron finalizados en Europa (FOREGS), Australia, China y Norteamérica (North American Soil Geochemical Landscapes Project).

Como reacción ante el desconocimiento e incapacidad de controlar los grandes cambios en el medio ambiente a escala global, la UNESCO a través de la International Union of Geological Sciences (IUGS) y de la International Association of Geochemistry and Cosmochemistry (IAGC), promovió el Proyecto **IGCP 259 “A Global Geochemical Database for environmental and resource management”**, define:

Impulsar el Proyecto **“Global Geochemical Baselines”** con el objetivo de obtener una base o red de referencia geoquímica global mediante la toma de muestras en celdas del GRN (160 x160 km), con una densidad de puntos de toma de muestras de aproximadamente 1 muestra / 5.000 km². Esta red geoquímica de referencia es, además de una herramienta fundamental para la valoración medio ambiental global debido a su baja densidad de muestreo, un medio importante de referencia para cartografías geoquímicas de más detalle y, además es un criterio fundamental para valorar bases de datos geoquímicos más antiguas antes de desecharlas para estos fines.

La primera acción o aplicación del programa de la UNESCO fue realizada por FOREGS (Agrupación de Servicios Geológicos Europeos) en Europa. Uno de los primeros pasos de dicho proyecto fue iniciar el proceso con la elaboración de un **manual de campo con protocolos de muestreo realizado en forma consensuada** por especialistas en Geoquímica del Grupo de Trabajo de Geoquímica (Salminen, R. et al, 1998) (Figura 1.1). El proyecto, con la participación de 25 países europeos, se realizó desde los años 1990s hasta su finalización y edición de resultados en 2005-2006 (Salminen, R., et al., 2005 y De Vos, W., et al., 2006). La toma de muestras se hizo en cada país por equipos de sus Servicios Geológicos. Los diferentes tipos de análisis químico se realizaron en un único laboratorio, con el fin de evitar la introducción de sesgos en los análisis debidos a su procedencia de laboratorios diferentes.

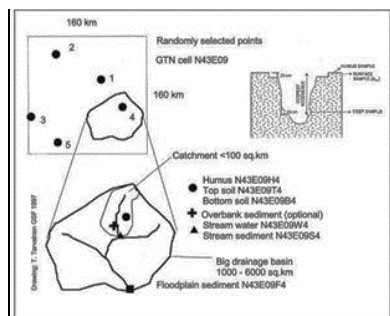


Figura 1.1. Esquema de los tipos de muestra en “Global Geochemical Baselines for Europe”

La necesidad de descubrir nuevos yacimientos minerales, muchos de los cuáles no presentan evidencias claras en superficie por encontrarse muy profundos, encubiertos o con débiles manifestaciones geoquímicas, hace urgente la necesidad de recolectar información geoquímica de calidad (precisión, exactitud) y que se cuantifiquen todos los elementos de interés en las más bajas concentraciones posibles. El establecimiento de programas de monitoreo y cuidado del ambiente y de salud pública, requieren con urgencia del conocimiento de las fuentes y concentraciones de aquellos elementos y especies que implican un riesgo para la salud y que están acumulados en suelos, aguas, sedimentos y rocas, entre otros.

Las consideraciones anteriores hacen parte de la sustentación que han tenido diversos países latinoamericanos para adelantar programas de levantamiento geoquímico orientados a adquirir información sistemática, multimedia y multipropósito para elaborar Atlas Geoquímicos.

Muchos Servicios Geológicos de países Iberoamericanos, desde hace varios años, han desarrollado y firmado acuerdos de cooperación con el Servicio Geológico de China, tales como Colombia, Cuba, Perú, México, Brasil, Chile y Argentina, reconociendo su valioso aporte y su experiencia en mapeo geoquímico multipropósito.

En los últimos años nuevas técnicas geoquímicas han comenzado a desarrollarse para facilitar el descubrimiento de yacimientos profundos, debido a la problemática surgida en la exploración con el casi total descubrimiento de los yacimientos aflorantes o subaflorantes, entre las cuales se pueden citar técnicas de lixiviación enzimática y de MIG (geoquímica del ión móvil), Organo Sulfur Geochemistry (OSG) y Soil Gas Hydrocarbons. Las anteriores técnicas geoquímicas especializadas, permiten extraer las fracciones iónicas de suelos y en algunos casos posibilita determinar series de hidrocarburos y contenidos de cationes adsorbidos, generalmente presentes en muy bajas concentraciones, con lo cual es posible identificar mineralizaciones profundas.

Todos estos métodos de prospección se han desarrollado ampliamente, gracias a su comprobada utilidad en el descubrimiento de importantes yacimientos minerales a nivel global.

El mejor reflejo de la fiabilidad y éxito de los métodos geoquímicos es su espectacular crecimiento y aplicación en la exploración de recursos del subsuelo en los últimos 50 años, así como la inclusión de datos geoquímicos en prácticamente cualquier programa de exploración en el mundo, junto con información geológica, geofísica y metalogénica.

Capítulo 2 – Planificación y muestreo

2.1. Planificación del muestreo

2.1.1 Planificación estratégica

Los estudios geoquímicos buscan medir la distribución de la concentración de los diferentes elementos químicos presentes en la naturaleza; la medición de estos se realiza mediante un método sistemático de muestreo de uno o varios materiales (medio de muestreo). Entre los medios de muestreos más utilizados se encuentran sedimentos, rocas, suelos, aguas y vegetación. La presentación de la distribución de abundancias de elementos químicos en la naturaleza se realiza por medio de mapas geoquímicos o mediante gráficos estadísticos.

Para la realización de todo estudio geoquímico es necesario tener en cuenta el objetivo del estudio, el cual puede ser con fines exploratorios, ambientales o multipropósito, entre otros. De la definición de este objetivo dependen el medio de muestreo seleccionado, la densidad de muestreo, la escala de trabajo, las técnicas analíticas a utilizarse, el control de calidad y los costos, entre otros

Sin duda una de las primeras aproximaciones al estudio geoquímico es tener en cuenta estudios de exploración o cartografías geoquímicas previas, porque pueden aportar información sobre los mecanismos de dispersión geoquímica y sobre la movilidad de los elementos en el medio superficial, así como sobre la granulometría de los materiales que pueden ser muestreados.

Si no existe experiencia previa de zonas próximas o con rasgos similares es conveniente realizar un muestreo de orientación o muestreo piloto en la propia zona, muestreando los distintos medios (suelos, sedimentos, etc.) en varios contextos geológicos y/o morfológicos, junto a mineralizaciones conocidas y lejos de ellas, y obteniendo diferentes fracciones granulométricas (0-63 μ , 63-125 μ , 125-180 μ , 180-250 μ , 250-500 μ). El objetivo de un muestreo de orientación, muy utilizado en estudios exploratorios de minerales, es reconocer en un área específica, no sólo los elementos presentes, sino también en qué medio y fracción granulométrica se manifiesta mejor el contraste entre los valores de fondo y los anómalos, para luego extrapolar con estas características el muestreo a toda la región de interés. El análisis de los resultados obtenidos permitirá responder a varias preguntas que se pueden plantear si se inicia la cartografía geoquímica de una zona más amplia. Si existen áreas contiguas ya cartografiadas, los parámetros a adoptar pueden ser similares a los de las campañas anteriores.

En términos generales un muestreo geoquímico identifica la variabilidad de los elementos químicos en la porción de la corteza terrestre objeto de estudio, por lo que es necesario prestar especial atención a la distribución geográfica y evitar criterios en el diseño del muestreo que puedan dar lugar a resultados sesgados, producto de muestras poco representativas o dependientes de factores tales como rasgos geológicos particulares (Webster et al., 1990). La distribución aleatoria de los puntos de muestreo ha sido señalada como una solución para el problema antes mencionado (Webster et al., 1990).

El muestreo “aleatorio estratificado” se convierte en una estrategia para la mayoría de los muestreos, especialmente los de reconocimiento regional y en este contexto el muestreo con diseño “sistemático” es aplicable para estudios de detalle, principalmente de suelos (Figuras 2.2.1.a, b, c)).

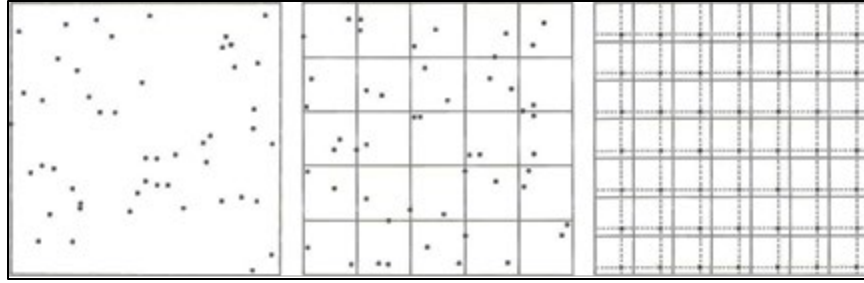


Figura 2.1.1 - Algunos esquemas de planes de muestreo: (a) aleatorio simple (49 muestras); (b) aleatorio estratificado, de 50 puntos en 25 cuadrados; (c) sistemático de 49 muestras. Según Webster et al (1990).

En la etapa de planeamiento es importante definir el esquema de *control de calidad del muestreo*, considerando muestras patrón o estándares, blancos, duplicados de campo y duplicados de laboratorio. La precisión y la exactitud del muestreo se controla con un porcentaje de muestras que puede variar entre el 10 y el 20% del total de muestras colectadas en un área, las cuales también permiten evaluar la varianza del muestreo.

Las muestras control, se definirán en las fichas de muestreo antes de la actividad de campo. La definición de estos controles de calidad y sus porcentajes se realiza previamente a la campaña de campo ya que implica un correcto marcado de las muestras de una manera consecutiva y determina también el número total de muestras a ser entregadas al laboratorio. La inserción de las muestras de control puede ser estratificada, aleatoria, o por grupo de muestras, método que debe ser definido antes de iniciar la campaña de recolección de muestras.

Es necesario definir previamente las técnicas analíticas que se van a utilizar, para evaluar costos y datos de analitos disponibles para el procesamiento e interpretación de los datos. Es importante considerar métodos y técnicas analíticas que permitan límites de detección lo más bajos posibles, de tal modo que se cuantifiquen los elementos de interés en el máximo número de muestras analizadas. Algunos autores recomiendan técnicas cuyas determinaciones tengan un límite de detección del elemento analizado con valores de por lo menos un orden de magnitud inferior a la abundancia media de ese elemento en la corteza terrestre.

2.1.2 Planificación del muestreo según el objetivo

Cartografía Geoquímica Global

En estudios geoquímicos de baja densidad o de muy baja densidad e incluso de ultra baja densidad, se utilizan los sedimentos de overbank y floodplain (sedimentos de llanuras de inundación) (Ottesen et al. 2010). Para garantizar un cubrimiento espacial homogéneo en este tipo de muestreos y permitir el manejo y procesamiento de datos geoquímicos, se diseña una red de muestreo, tomando como referencia la red de muestreo geoquímico global con celdas de 160x160 km, las cuáles se subdividen en celdas de 80x80 km (Figura 2.1.2).

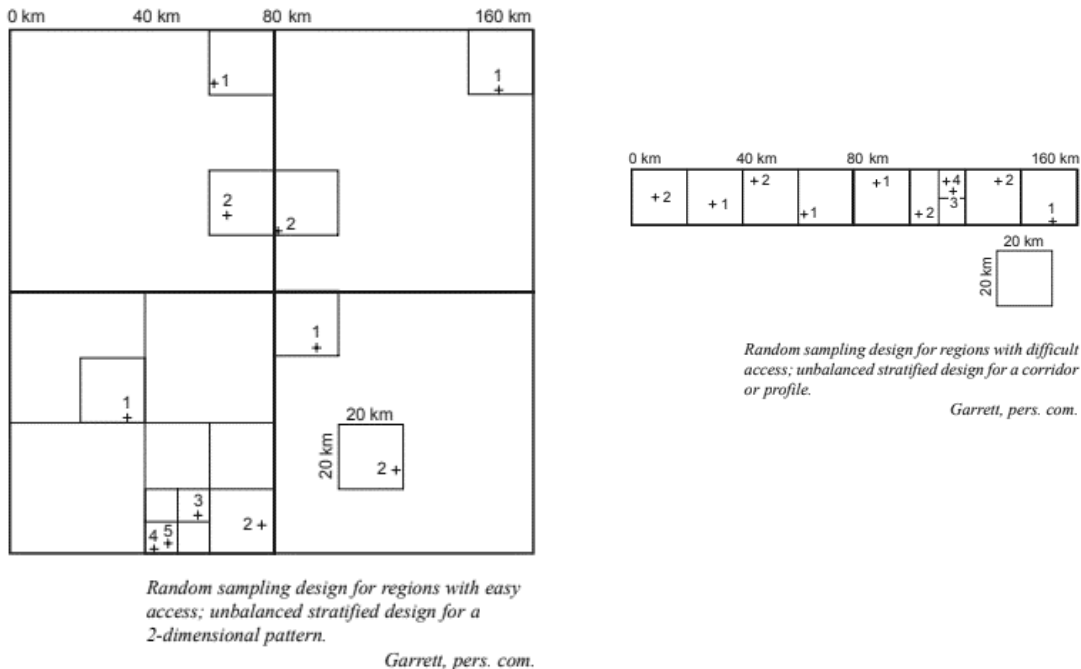


Figura 2.1.2 – Diseño de planificación de muestras aleatorias con patrón estratificado de áreas de fácil acceso y en perfil (Darnley et al., 1995a)

En cada celda de 80x80 km se delimitan las cuencas y para el caso del mapa geoquímico del mundo, se considera adecuado tener un cubrimiento del ochenta por ciento (80%) de cada celda (Figura 2.1.3 y 2.1.4). Las unidades básicas de muestreo pueden ser:

- Muestra de *floodplain* en cuencas de drenaje con áreas de captación entre 1000 y 6000 km².
- Muestras de *overbank*, sedimentos de corriente y suelos en cuencas de drenaje con áreas de captación entre 500 y 1000 Km².

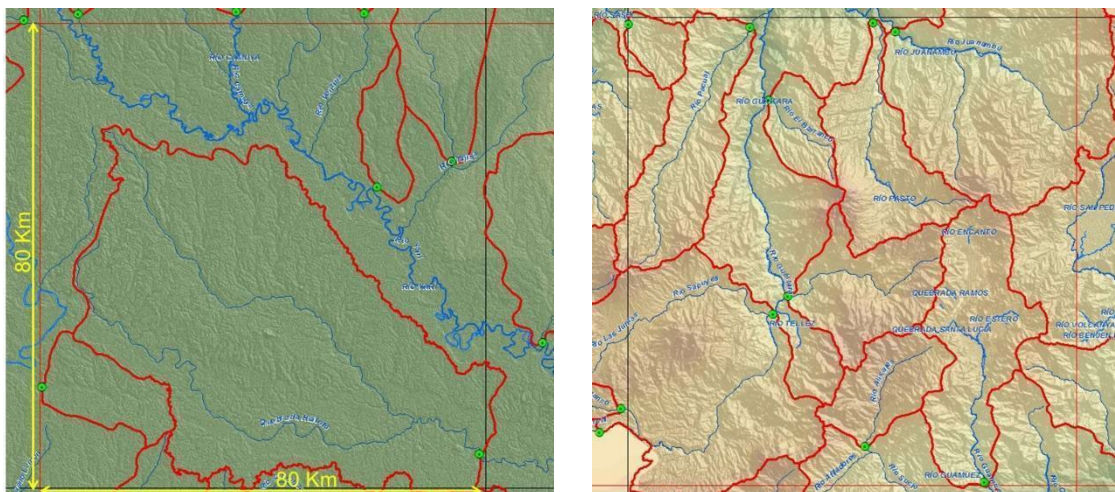


Figura 2.1.3. Ejemplo de diseño de muestreo en celdas de 80x80 Km en el proyecto Línea Base Geoquímica Mundial en Colombia (2018). Las líneas rojas representan la cuenca seleccionada y el punto verde el sitio de la toma de la muestra.

En caso de que no se pueda tomar la muestra en el punto diseñado en la red de muestreo, ya sea por dificultades de acceso o alguna otra razón, el punto de muestreo puede ser relocalizado. No se deben coleccionar muestras compuestas a partir de submuestras tomadas en distintos cauces (lechos).

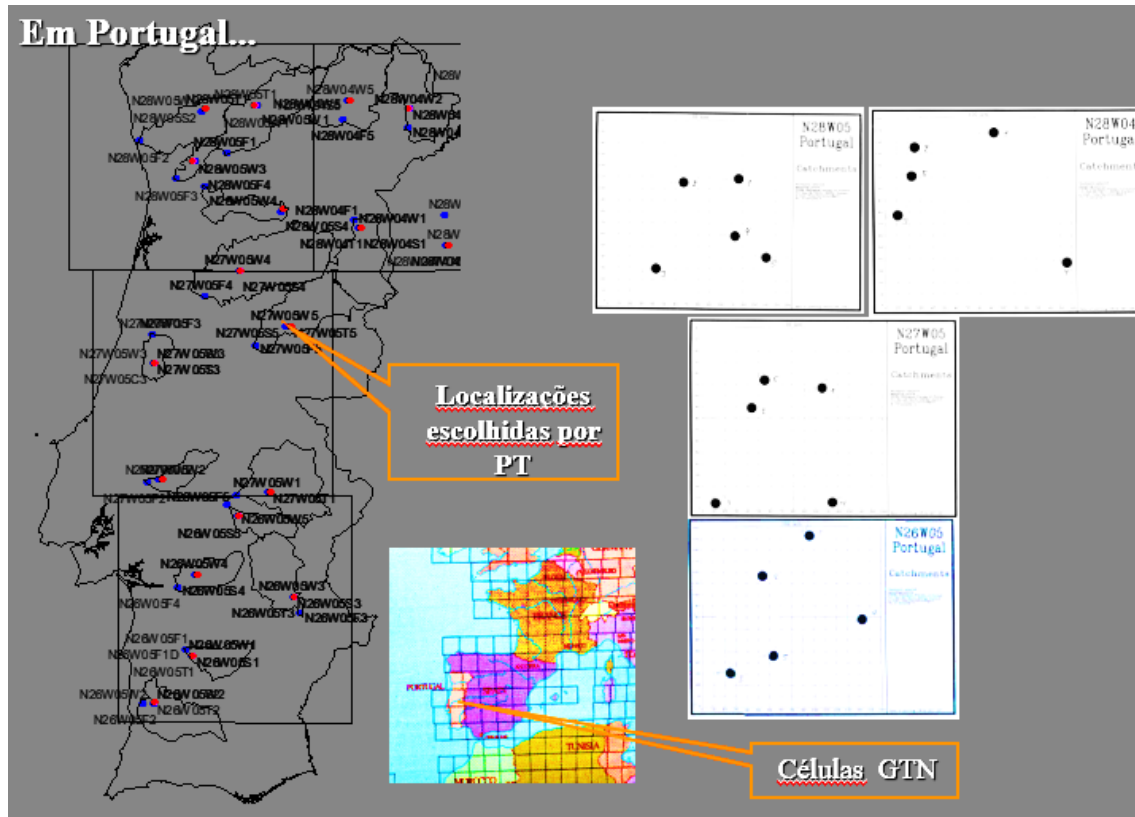


Figura 2.1.4 - Esquema de planificación del muestreo inicial (muestras de planicie de inundación- floodplain) para la cartografía continental de FOREGS en Portugal a partir del cual se planificó la colecta de todos los medios de muestreo

Cartografía Geoquímica Nacional

Teniendo en cuenta que la cartografía geoquímica nacional corresponde a una estrategia de los Servicios Geológicos de cada país y tiene una metodología multipropósito, debe presentar una densidad de muestreo correspondiente a la dimensión del territorio nacional, por tanto, puede corresponder a una densidad regional o local, pero con una cobertura nacional. Aunque la opción es potestativa de cada Servicio Geológico, la metodología y estrategia será la misma que para una campaña regional.

Cartografía Geoquímica Regional

Para muestreos regionales, normalmente se utiliza muestreo de sedimentos de corriente y suelos para los cuales se utilizan hojas (planchas) topográficas con escalas de 1:50000 y 1:25000. Para escalas más amplias (ejemplo 1:100000) se utilizan también sedimentos aluviales para obtener mediante bateo

concentrados de minerales pesados, los cuales se colectan para cartografía geoquímica con énfasis en recursos minerales.

En el caso de sedimentos activos de corriente y suelos, y con el fin de garantizar una mayor cobertura de la zona de estudio, se delimitan cuencas hidrográficas o cuencas de drenaje, a partir de la red hidrográfica principal y secundaria. Se han definido como unidades básicas de muestreo, las cuencas de drenaje de orden 1, 2 o máximo 3 de acuerdo con la jerarquía de drenajes de Strahler (1952), en las cuales se colectarán las muestras de sedimentos activos de corriente. (Figura 2.1.5)

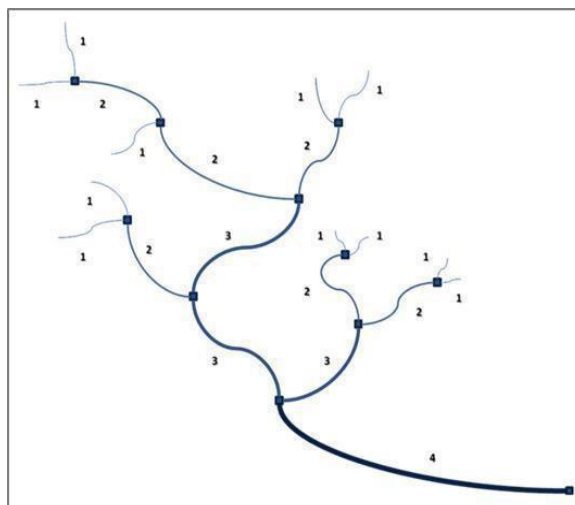


Figura 2.1.5. Orden de drenajes, según Strahler (1952)

Los sitios de muestreo de sedimentos de corriente se localizan en la parte más baja de la cuenca de drenaje, a no menos de 50 m antes de la desembocadura de la cuenca muestreada en el drenaje de orden mayor o drenaje receptor, para evitar contaminación del sedimento colectado, por mezcla con sedimentos removilizados y provenientes del drenaje receptor. Los suelos correspondientes a muestreo regional se colectan aguas arriba en el área de captación de la cuenca de drenaje (Figura 2.1.6).

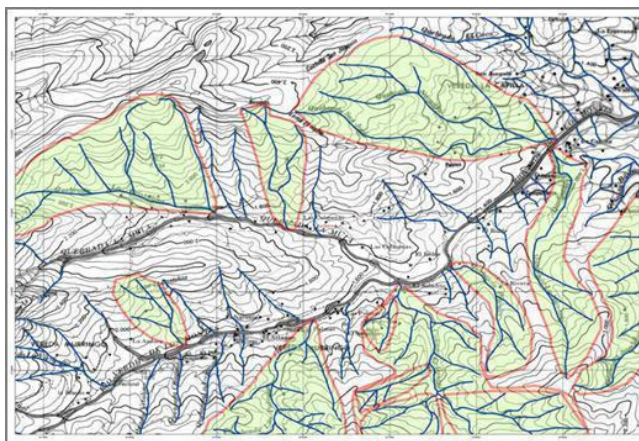


Figura 2.1.6- Las zonas verdes representan el área de captación de la cuenca de drenaje donde se muestrea el sedimento de corriente y suelo

En el caso de los sedimentos aluviales para la obtención de concentrados de minerales pesados, teniendo en cuenta experiencias previas de diversos países y rasgos morfoclimáticos de cada región, se utilizan proporciones más bajas que para los sedimentos de corriente, entre 1/4 y 1/7. Los sitios de muestreo de sedimentos aluviales para obtener concentrados de batea se localizan en cuencas más grandes que incluyen las subcuencas en las que se recolectan muestras de sedimentos de corriente o muestras de suelo (Figura 2.1.7).

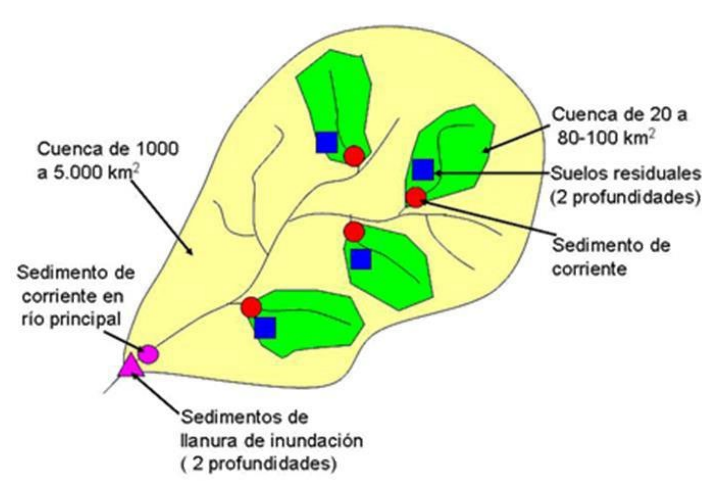


Figura 2.1.7. Esquema de disposición de muestras en diferentes medios para la cartografía geoquímica

En el *Estudio Geoambiental de la Cordillera Fuegoina*, región “prístina” de los Andes Patagónicos en Argentina, el muestreo geoquímico tuvo como objetivo definir la *Línea base geoquímica* y los *Umbrales de anomalías regionales* utilizando análisis multielemento, así como también identificar *anomalías geoquímicas* para la evaluación de los Recursos Minerales del área. El diseño del muestreo incluyó muestras de sedimentos de corriente y suelos por sitio seleccionado y muestras en “grandes cuencas” también a partir de sedimentos de corriente (Figura 2.1.8).

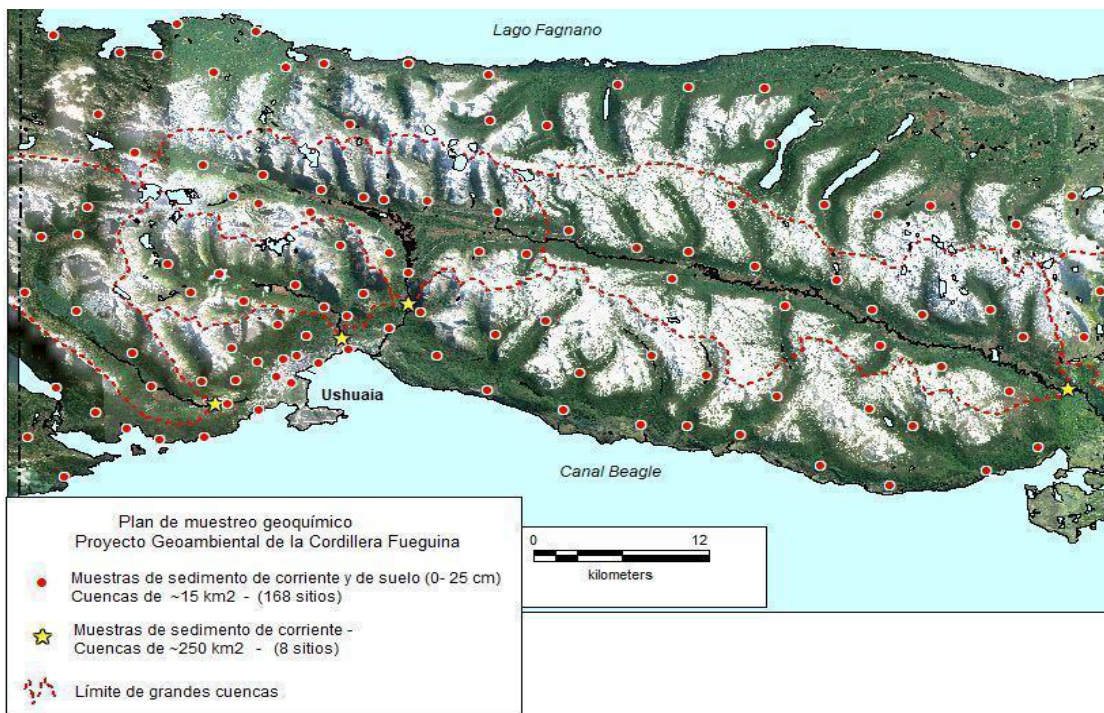


Figura 2.1.8. Diseño de muestreo geoquímico regional de sedimentos de corriente y suelos. Detalle del Sector Occidental de la Cordillera Fueguina, Tierra del Fuego, Argentina.

Cartografía Geoquímica Local

En el caso de muestreos detallados, en donde las áreas a estudiar son menores, y pueden ser para programas exploratorios o para estudios ambientales, se utilizan frecuentemente suelos residuales (superficiales, o suelos a dos profundidades o representativos de dos horizontes) así como sedimentos de corriente y rocas, utilizando mapas topográficos de escalas mayores que la escala 1:25000. La escala de la base cartográfica, así como la densidad de muestreo depende del objetivo del estudio. Si en el muestreo de exploración se colectan suelos y sedimentos de corriente, los esquemas de muestro son aleatorios y las muestras de suelos se toman próximas a los sedimentos de corriente para optimizar costos. Sin embargo, si se trata de una campaña exclusiva de suelos residuales, se utilizan diseños de muestreo que tengan en cuenta los perfiles de muestreo con base en una grilla definida.

Muestreo de suelos residuales en estudios locales de prospección minera en grilla

Para planificar muestreo de suelos en un estudio de detalle, primero se define el objetivo del estudio: Ejemplo de investigación de los halos geoquímicos en los depósitos Lombador y Semblana en el área minera de Neves Corvo, Faja Pirítica Ibérica en Alentejo, Portugal - (Proyecto EXPLORA - ALT20-03-0145-FEDER-000025 en la región de Neves Corvo), en donde se colectaron suelos residuales en malla de dos dimensiones (Figura 2.1.9).

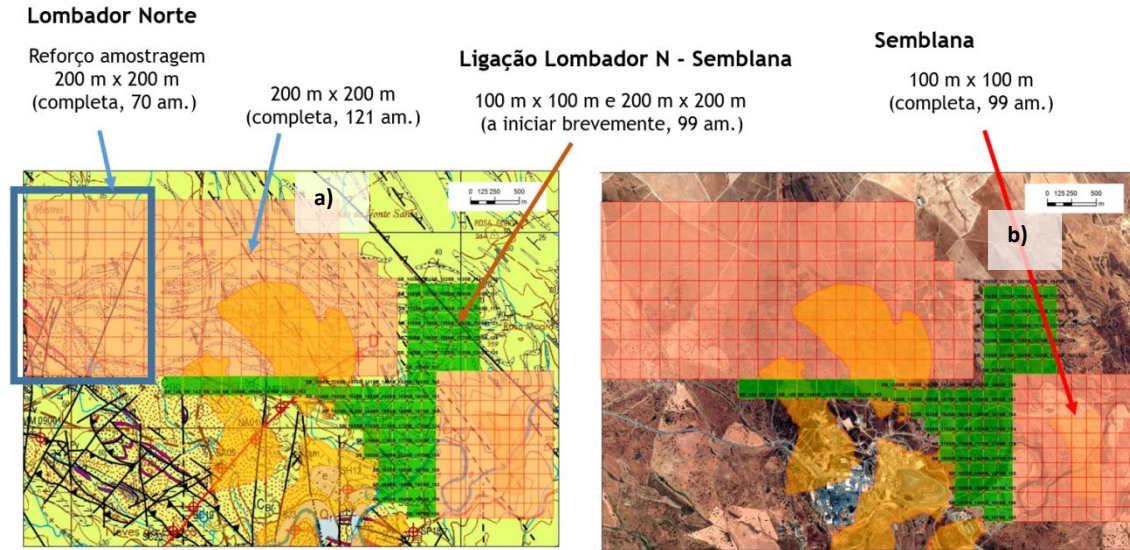


Figura 2.1.9 – Diseño de dos dimensiones de mallas de muestreo sobre las áreas mineralizadas.

Se diseñaron dos mallas de muestreo, 100x100 m sobre las áreas mineralizadas y 200x200m sobre las áreas próximas a las áreas mineralizadas.

Planificación de muestreo de rocas puntual (chips), canal (muestra continua) o en perfil (representativa de la geología local)

El muestreo de las rocas es probablemente el más difícil y es el procedimiento de campo que más consume tiempo, especialmente si se planea llevar a cabo en una cuadrícula regular o en poligonales espaciadas regularmente, ya que es muy poco probable que se complete un afloramiento en cada cuadrícula. Si los afloramientos representativos no están dentro del rango de los nodos de la cuadrícula de muestreo, entonces es posible que se deban efectuar perforaciones para encontrar la roca. Por lo tanto, durante la etapa de planificación de una campaña de geoquímica de rocas, es bueno conocer previamente la disponibilidad de afloramientos. En este punto, es en donde la información de un estudio de orientación se vuelve muy importante. Adicionalmente para programas de exploración de minerales, en donde es necesario efectuar mapeo geológico, el geoquímico obtiene del geólogo la localización de los afloramientos y una descripción sucinta de la granulometría de las rocas presentes en el área a muestrear.

Lo anterior permite conocer la distribución, tamaño y tipo de afloramientos, así como conocer heterogeneidades y variaciones existentes en el área investigada, de tal modo que el geoquímico planifique el muestreo de rocas considerando el uso de una cuadrícula regular o mediante diseño de muestreo aleatorio, basado en la distribución de los afloramientos. En los casos en que la distribución de afloramientos sea deficiente, se puede optar por realizar un estudio geoquímico del suelo residual. Sin embargo, en caso de que no se realice un estudio de orientación o de mapeo, antes del muestreo geoquímico de rocas, es necesario realizar mapeo inicial de la distribución de afloramientos utilizando fotografías aéreas e imágenes de satélite de la zona. Esta información es vital para planificar y estimar costos de la campaña de muestreo de campo, y también para evaluar la viabilidad y la eficacia del estudio geoquímico de rocas (Fig. 2.1.10).

El método de campo más común en la geoquímica de rocas es la llamada técnica de muestreo de fragmentos (astillas) de roca. Para que el muestreo de fragmentos (astillas) de roca sea representativo del área, es recomendable identificar previamente las dimensiones óptimas del afloramiento que se va a muestrear y así seleccionar los fragmentos más apropiados a muestrear.

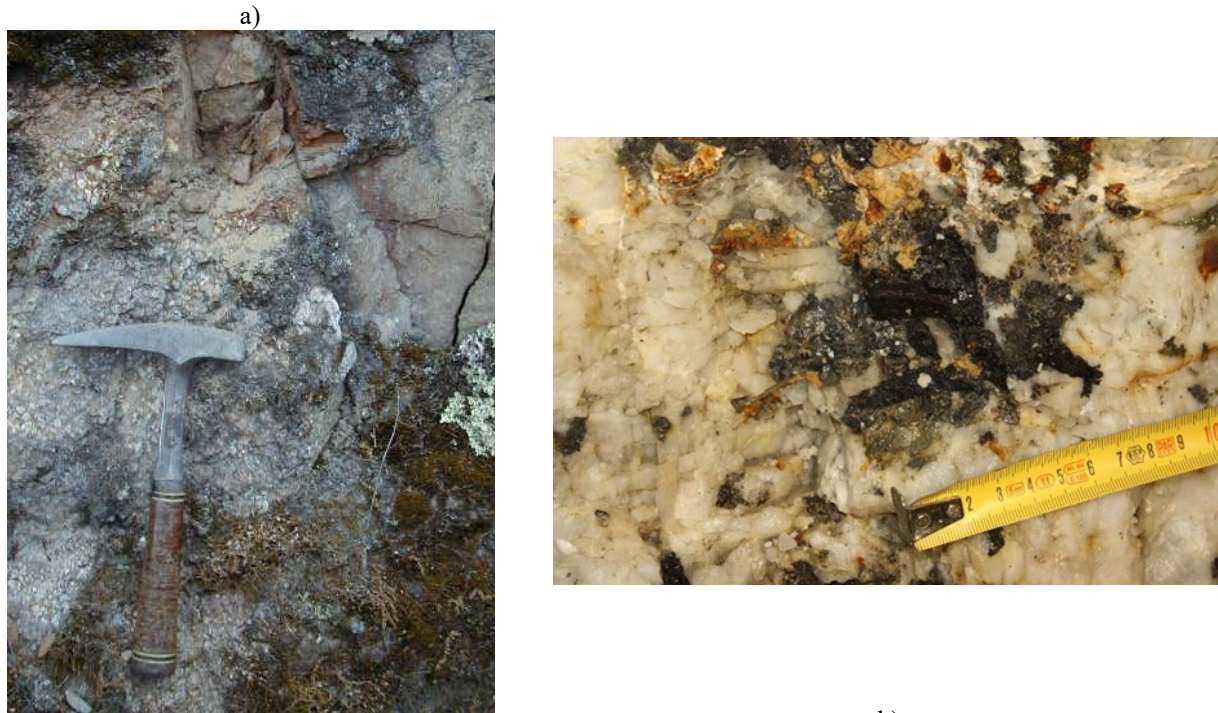


Figura 2.1.10 - a) Afloramiento en el talud de una carretera en la Región de Nisa, Portugal; b) Filón en galería- Mina da Panasqueira (Portugal) donde fue necesario observar y muestrear las dos litologías presentes en la escala y objetivo apropiados

2.1.3. Planificación y organización de una campaña de muestreo geoquímico

2.1.3.1 Información preliminar

Previamente al desarrollo de las campañas de campo, es necesario reunir toda la información relevante al área de trabajo, se debe consultar la cartográfica del área, ya sea en formatos análogos y digitales, procurando disponer de toda la información en un formato digital.

La documentación necesaria y deseable incluye:

- Cartografía topográfica a escala 1/50.000, 1/100.000, o a la escala disponible que cumpla con el requerimiento de la escala de trabajo.
- Mapa geológico simplificado, evitando sobrecarga en símbolos de estructuras o rasgos geológicos de muy pequeña extensión (escala 1/50.000, 1/200.000, se recomienda que el mapa sea más detallado que la escala de trabajo).
- Mapas geofísicos
- Mapas geoquímicos

- Mapa o cobertura de la red hidrográfica, con arroyos de hasta primer orden.
- Mapa de suelos (1/200.000 o inferior).
- Fotografías aéreas, orto fotografías, o imagen satelital, o Modelos Digital de elevación de terreno (DEM).
- Cobertura o mapa metalogénicos, con indicios de mineralización, antiguas minas, depósitos minerales, con la descripción de minerales principales, tipo de depósitos, etc.
- Mapas o coberturas con principales centros industriales, fundiciones, incineradoras o centrales térmicas, entre otras.
- Mapa territorial de usos del suelo.

Toda la información cartográfica recolectada y almacenada debe estar en un mismo sistema de coordenadas.

2.1.3.2. Diseño del muestreo

La estrategia llevada a cabo por la mayoría de los Servicios Geológicos para el diseño de muestreo de las campañas geoquímicas utiliza como cartografía base las hojas topográficas a distintas escalas, dependiendo de la densidad de muestreo (baja densidad, regional o de detalle). Una vez decidida la densidad de muestreo, se divide la hoja topográfica en celdas, rectángulos o cuadros, con superficie representativa de la densidad elegida, para situar un punto en cada celda, siguiendo los criterios aplicables a cada uno de los medios de muestreo, tal y como se explicó previamente. Si la campaña conlleva varios tipos de muestreos con distintas densidades de muestreo, se colocará cada muestra en las celdas correspondientes, de acuerdo con la densidad de muestreo seleccionada para cada medio a coleccionar.

El tipo de muestra a coleccionar depende de las condiciones morfo climáticas del área a estudiar. Por ejemplo, en una región desértica con una importante dispersión aérea de partículas, una campaña de muestras muy superficiales puede resultar en resultados falsos de la distribución de los elementos químicos.

En el caso de suelos es necesario definir también la profundidad del perfil para coleccionar la muestra, lo cual depende del objetivo del estudio. En estudios para exploración de minerales normalmente se coleccionan muestras de horizontes más profundos, horizonte de acumulación o de horizontes cerca de la roca, mientras que para estudios ambientales se coleccionan muestras más superficiales que indiquen posible contaminación, polución o aporte de actividades antrópicas.

Para prevenir y evitar, en lo posible, los errores de numeración de muestras (lo más común es la asignación de un número consecutivo), en los mapas de diseño de muestreo, se puede colocar el identificador o código de la muestra junto al símbolo de cada muestra. Otra opción es que las tarjetas o formatos de muestreo tengan impresas las etiquetas respectivas y un troquel con la misma etiqueta (o identificador), en cuyo caso el desprendible se introduce en la bolsa junto con la muestra. A medida que se avanza en el muestreo (sitios predefinidos) se asigna a cada muestra la etiqueta o identificador de la tarjeta correspondiente a este sitio, con lo cual no es necesario colocar el identificador de las muestras en el mapa en el momento de planificar el muestreo.

Otra alternativa es colocar el identificador de la muestra en la plancha topográfica utilizada, colocando una sigla dependiendo del tipo de muestra, un número consecutivo y las iniciales del muestreador. De

esta manera se puede tener una idea rápida y precisa de la ubicación de la muestra, el medio de muestreo y el responsable.

2.1.3.3. Escala de mapeo geoquímico

Ultrabaja densidad – Cartografía global (> 1.000 Km²)

Los estudios encaminados a obtener información acerca de la distribución espacial de los elementos químicos en los aproximadamente 140 millones de km² del área de la superficie del mundo, están justificados en que la vida en su totalidad y la calidad de vida humana se dan en función de ese conocimiento y del entendimiento de las condiciones que lo rigen, cobrando relevancia en exploración de minerales de interés económico, agroindustria, salud humana y animal, planificación y uso del suelo (A.G. Darnley, 1995b). De conformidad a las investigaciones realizadas y con la finalidad de dar alcance a la obtención de una línea base geoquímica a nivel global, formalmente se estableció el proyecto de Mapeo Geoquímico Internacional en 1987 (Arthur G. Darnley, 1990), y se establecieron los requerimientos que solucionan problemas técnicos y administrativos, y se define que para obtener los datos que alimenten el Mapa Geoquímico del Mundo de manera eficiente y efectiva, se realizará a través de adquisición de la información geoquímica en celdas de 160 km x 160 km, y así las cosas, el medio de muestreo adecuado es sedimento de llanura de inundación en cuencas de entre 1.000 a 6.000 km² (A.G. Darnley, 1995a) (Salminen et al., 1998); sin perder de vista las limitaciones generadas por la escala de mapeo, la densidad de muestreo y la necesidad de cooperación a nivel internacional y/o continental entre los organismos de los diferentes países, se logra observar los patrones de distribución de los elementos químicos (Wang et al., 2015). En función del área del país se realizan programas de muestreo de ultrabaja (3.000 a 6.000 km²) y baja densidad (1.000 a 3.000 km²) mediante sedimentos de llanura de inundación, sedimentos de sobrebanca y suelos aluviales en grandes cuencas.

Baja densidad – Nacional (100-1.000 Km²) a Regional (10-100 Km²)

En términos generales, la adecuada planificación de un país está ligada de manera directa al conocimiento de su información geoquímica, por tal razón, las entidades e instituciones encargadas de la adquisición, análisis e interpretación de la geología del orden nacional, normalmente se encargan de generar mapas geoquímicos a través de sedimentos de corriente en cuencas de máximo 100 km² de esta manera generan la información que alimenta sus bases de datos para analizar, interpretar y modelar las tendencias geoquímicas a nivel regional, orientados principalmente a delimitar provincias geoquímicas y anomalías geoquímicas nacionales y regionales (Locutura et al., 2012, Prieto-Rincón & Espinosa-Gonzalez, 2011; Ferreira, 2000; SEGEMAR, 2001), Figuras 2.1.11 y 2.1.12. Lo anterior sin perder de vista que también se acostumbra capturar información de otros medios de muestreo como suelo, agua, roca que suministran información de línea base geoquímica nacional y puede usarse como herramienta en los planes de ordenamiento territorial, legislación ambiental, demarcación de zonas de interés agroindustrial y de minerales de interés económico.

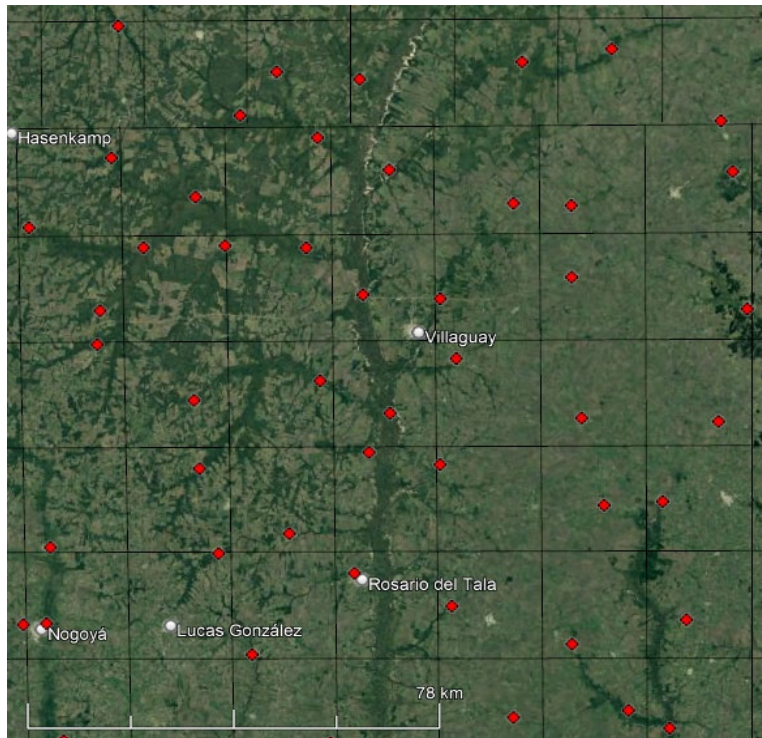


Figura 2.1.11 - Muestreo Geoquímico de Baja Densidad; sedimentos de corriente en celda de 20 Km x 20 Km (ver escala gráfica). Región mesopotámica, Rep. Argentina.



Figura 2.1.12 - Muestreo sedimentos de corriente en celda de 20 Km x 20 Km. Región mesopotámica, Rep. Argentina.

Alta densidad – Local/Exploración (escala 1:5000 – 1:500)

Si el muestreo de los diferentes materiales geológicos, sea sedimento de corriente, suelo, agua, roca, es colectada bajo una red entre 1 a 5 km², resulta en un insumo que, si es interpretado bajo el apropiado

contexto geológico, es valioso a la hora de definir blancos de exploración de minerales de interés económico, agroindustrial, así como para la definición de estudios referentes a la afectación causada a la salud por la roca circundante (Demetriades, 2014).

2.1.3.4. Control de calidad y métodos analíticos.

En la etapa de planeamiento es importante definir el esquema de *control de calidad del muestreo*, conformado por las muestras patrón o estándares, blancos, duplicados de campo y duplicados de laboratorio. Se recomienda medir la precisión y la exactitud del muestreo con un porcentaje de muestras intercaladas de entre el 10 y el 20% del total de muestras, y definir las en las tarjetas de muestreo antes de la salida al campo. La definición de los controles de calidad y su porcentaje se realiza previo a la campaña de campo para obtener un correcto marcado de las muestras de una manera consecutiva y para determinar el número total de muestras a ser entregadas al laboratorio. La inserción de las muestras de control puede ser estratificada, aleatoria, o por grupo de muestras, sin embargo, se debe definir el método antes de iniciar la campaña de recolección de muestras para evitar cualquier confusión.

Otro aspecto importante es la definición de las técnicas analíticas a utilizarse ya que en muchas ocasiones están supeditadas no solo a los objetivos del estudio geoquímico, sino también a un presupuesto disponible. Un ejemplo de lo anterior son los análisis químicos para litogeoquímica, más costoso que un paquete multielemental para roca.

2.1.3.5. Planificación de itinerarios para el muestreo

Para planear los itinerarios del muestreo y maximizar la eficiencia de la campaña de muestreo, es importante en primer lugar, recopilar y revisar la información existente de todo tipo: geográfica, cartográfica, hidrográfica, geomorfológica, geofísica (reseñar si existe), geológica y geoquímica, entre otra, que esté disponible sobre las zonas de trabajo. Esta actividad incluye la obtención de material cartográfico análogo y digital (mapas), y documental (publicaciones, informes, datos).

El planteamiento de los itinerarios debe ser llevado a cabo por el geoquímico ayudándose de medios impresos (cartografía de base topográfica a escala 1:50.000 o 1:25000 o incluso a escalas de más detalle si el estudio que se va a llevar a cabo es de tipo táctico) y de medios digitales como pueden ser las fotos aéreas, Google Earth, DEM, entre otros (Figuras 2.1.13 y 2.1.14). Es útil disponer de herramientas SIG (sistemas de información geográfica) que permiten superponer distintas capas (como puede ser el caso de la red de carreteras) para establecer posibles itinerarios. Es fundamental conocer la red de carreteras y caminos existentes que permitan el desplazamiento a zonas lo más próximas posibles a los puntos de muestreo, para lo cual es muy útil el uso de GPS.



Figura 2.1.13. Imagen de Google Earth de las proximidades de la localidad de Lobos (Argentina).

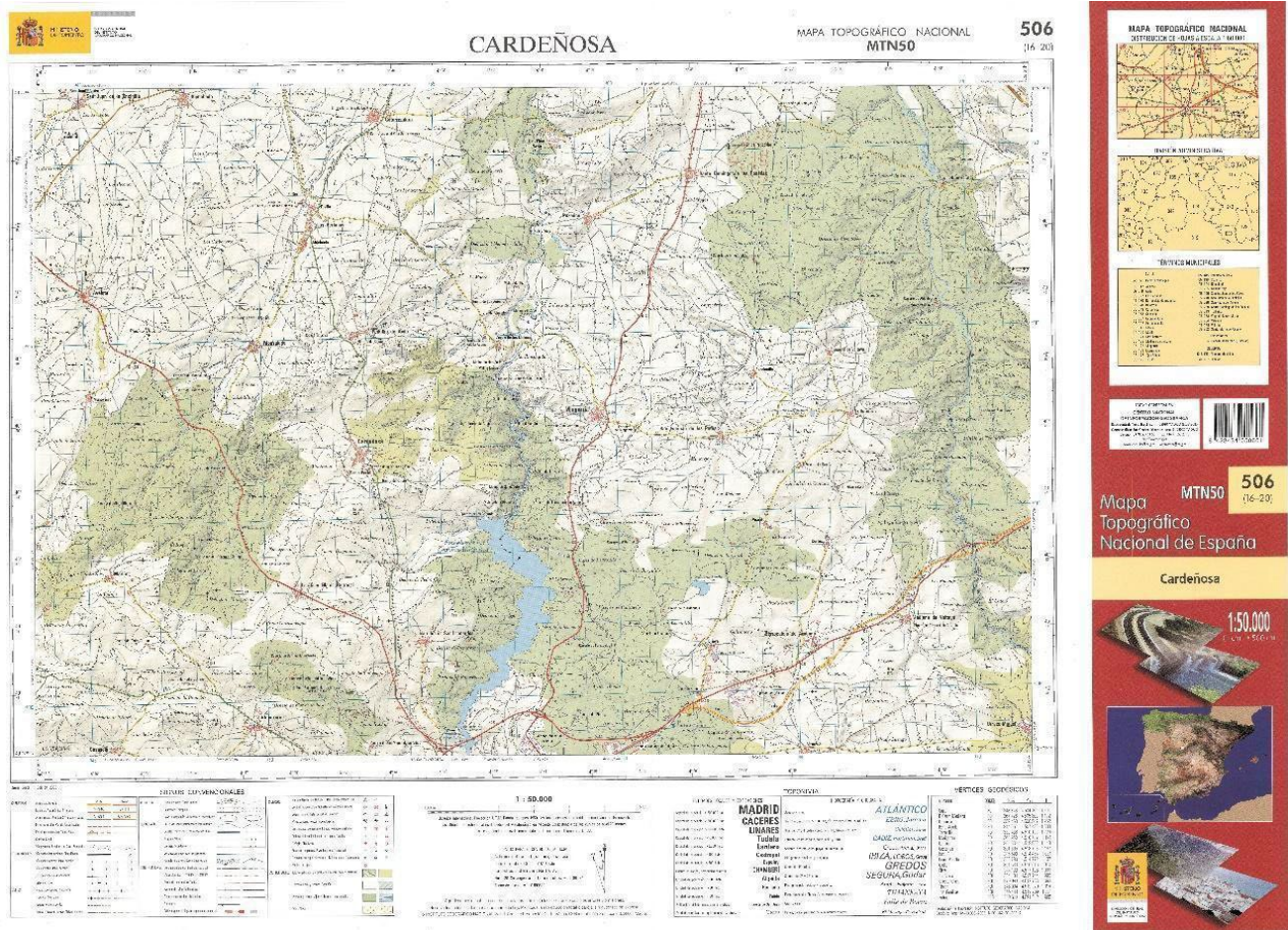


Figura 2.1.14. Mapa topográfico 1:50000 de Cardenosa (España).

2.1.3.6. Logística, equipos y materiales.

- *Grupos de trabajo para el muestreo de sedimentos de corriente y aluviales, suelos, plantas, agua*

Los equipos de trabajo, en lo posible, lo deben conformar dos personas. Un geoquímico/geólogo, que por su formación y experiencia será el responsable de la calidad en la toma de las muestras, es quien acepta o no el punto de muestreo previsto, y quien en caso de que el punto preseleccionado no sea adecuado, procederá a elegir un punto alternativo en un área próxima a la inicialmente considerada. El geoquímico/geólogo también es el encargado de registrar los datos en la ficha o formato de muestreo con las observaciones que se consideren pertinentes y numera o identifica la muestra colectada. También es conveniente contar con un ayudante de geoquímico, que será el que realice las operaciones manuales de la toma de muestras bajo la supervisión del prospector.

En el caso de que no sea posible la presencia de las dos personas en cada equipo de trabajo, es indispensable que el geoquímico conforme el grupo de trabajo.

- *Grupo de trabajo para el muestreo de rocas*

La localización de los afloramientos, el conocimiento básico de las rocas a muestrear y la descripción de la granulometría de las rocas son condiciones necesarias para un correcto muestreo de rocas, de tal modo que el coleccionar debe ser geoquímico o geólogo para obtener muestras representativas y adecuadas.

- *Materiales*

Entre los materiales que debe disponer un grupo de muestreo geoquímico, se incluyen los siguientes

ELEMENTO	OBSERVACIÓN
Vehículo 4x4	Necesario para el desplazamiento de los grupos de campo hasta los lugares de muestreo.
GPS (<i>Global Position System</i>)	Con conexión satelital rápida y de precisión mínima de 3 m, y de última generación, que permita registrar fecha y hora de captura de datos y con capacidad para registrar los códigos de las muestras hasta de 20 caracteres.
Cámara fotográfica digital	Con sistema de enfoque variable que permita acercamientos de tomas a detalle y, registrar fecha y hora de la toma de las fotografías.
Brújula, lupa de mano, altímetro <i>Thommen</i> o de precisión, martillo de geólogo, lápiz rayador – imán y flexómetro.	Elementos de trabajo geológico, en buen estado de funcionamiento. Dentro de estos elementos es importante incluir ácido clorhídrico (HCl al 10%), para el reconocimiento de las rocas carbonatadas.

Medidor de pH digital (pH-metro), T, conductividad.	Con sensibilidad de una cifra decimal, el cual debe ser calibrado con sus respectivas soluciones, incluyendo agua destilada para lavado previo antes de la toma de muestras.
Tamices de plástico	Con diferentes aperturas de malla de nylon.
Cubos de plástico	Sin pintar (libre de metales) con capacidad de 10 litros.
Pala de mano y azadón	Plástica y sin pintar (libre de metales).
Bolsas y sacos	Plásticas, de polietileno, transparente de alta densidad, calibre 4 ó 5 (material libre de metales), con medidas aproximadas de 30 cm de ancho x 40 cm de alto, y capacidad para 3 kg de peso. Además, sacos de polietileno de aproximadamente 70 x 40 cm, para introducir grupos de 8-10 bolsas de muestras individuales o para la toma de muestras húmedas. Finalmente, cuerdas de plástico para asegurar su cierre. Las bolsas de papel kraft permiten, en el caso de sedimentos, que la muestra vaya perdiendo humedad a temperatura ambiente.
Bolsitas de tamaño tarjeta y tarjetas	Para introducir en el interior de la bolsa con la muestra, la tarjeta debidamente numerada mediante lapicero.
Guantes	Desechables, industriales, de látex. Se requiere un par por cada persona que manipule la muestra antes de ser sellada. NOTA: por cada muestra colectada debe utilizarse guantes de látex nuevos.
Fichas de muestreo	Ficha de muestreo para registro de datos e información
Material Cartográfico	Mapas topográficos y geológicos, a la escala más detallada disponible en la cartografía (1:100.000, 1:50.000 o 1:25.000), para cada zona de trabajo. Fotografías aéreas e imágenes satelitales (si están disponibles).
Mochila con instrumentos útiles para el campo	Machete con funda para apertura de trochas, linterna, lazo o manila (20 m aprox.) y si es el caso, aislante térmico, hamaca, toldillo y carpa, entre otros. Botiquín y protector solar.
Elementos de papelería	Etiquetas autoadhesivas, cinta de enmascarar ancha de 5 cm (2.5 pulgadas), cinta transparente ancha de 5 cm (2.5 pulgadas). Marcadores de tinta indeleble de color, escalímetros, bisturí, borrador, tajalápiz, portaminas, micropuntas, libretas de campo (topográficas), tabla porta libretas.
Cepillos	Cepillos de cerda dura para la limpieza de recipientes e instrumentos después de la colecta de cada muestra

2.1.3.7. Muestreo de territorios de acuerdo con el clima (generalidades)

El suelo es el medio de muestreo más influenciado por el clima, y se desarrolla en mayor o menor grado de acuerdo con la vegetación que se desarrolla en él, con el mayor o menor porcentaje de materia orgánica y con la erosión de la roca a partir de la cual se desarrolla. Los sedimentos también son influenciados por el clima, aunque en menor medida que los suelos, de tal modo que se hace necesario identificar cual es el orden del arroyo en la cuenca que permiten detectar una determinada anomalía (Carranza, 2004). La roca sufre más o menos meteorización según sea una región más cálida o más fría, y también si es más húmeda o más seca.

En el momento de planificar y diseñar un muestreo geoquímico es muy difícil evaluar *a priori* qué medio de muestreo, granulometría y densidad de muestreo implementar, por tanto, es aconsejable, siempre que sea posible, realizar un estudio de orientación relacionado con la región morfoclimática donde se llevará a cabo dicho muestreo geoquímico.

2.1.3.7.1. Territorios de clima templado (templado) - caso de la Península Ibérica (Mediterráneo) y parte de Sudamérica

Las regiones templadas también conocidas como templadas se caracterizan por presentar cuatro estaciones al año, dependiendo de las lluvias y de la temperatura, de tal modo que la meteorización química (intemperismo) es el factor más importante en el desarrollo del suelo y del régimen de depositación del sedimento. La meteorización (intemperismo), en este caso produce hidróxidos de hierro como hidróxidos amorfos, goethita $\text{Fe}(\text{OH})_3$, oxi-hidróxidos FeOOH y minerales arcillosos derivados de la moscovita, como por ejemplo la illita por la pérdida de iones K^+ . La liberación de hidróxidos de hierro genera un suelo de color castaño- amarillento. En climas templados con veranos secos diferenciados, la formación de hematita Fe_2O_3 le imprime al suelo colores más rojizos. Cuando el material parental del suelo es calcáreo, el intemperismo químico produce primero la disolución de los carbonatos y posteriormente pueden ocurrir los procesos mencionados anteriormente (Spaargaren e Deckers, 2005). Las regiones templadas corresponden al 7% de la superficie terrestre, en donde vive aproximadamente el 40% de la población mundial. En este caso, el muestreo de suelos y sedimentos depende del objetivo y de la escala del estudio y no tanto de las condiciones de representatividad. En estos territorios generalmente es posible hacer muestreos de cualquiera de los dos medios de muestreo que se usan habitualmente tanto para cartografía geoquímica regional como para estudios específicos de prospección o estudios ambientales. En éstos ambientes climáticos el régimen de lluvias permite generalmente que los cuerpos de agua de 1ª y 2ª orden mantengan agua corriente durante el invierno y a veces permanezcan secos en verano, mientras que los cursos de orden superior pueden tener agua todo el año. Este clima permite, por lo tanto, coleccionar, tanto sedimentos de corriente en lecho húmedo o seco y también suelos con un desarrollo tal que es posible muestrear uno o dos horizontes (Figura 2.1.15).

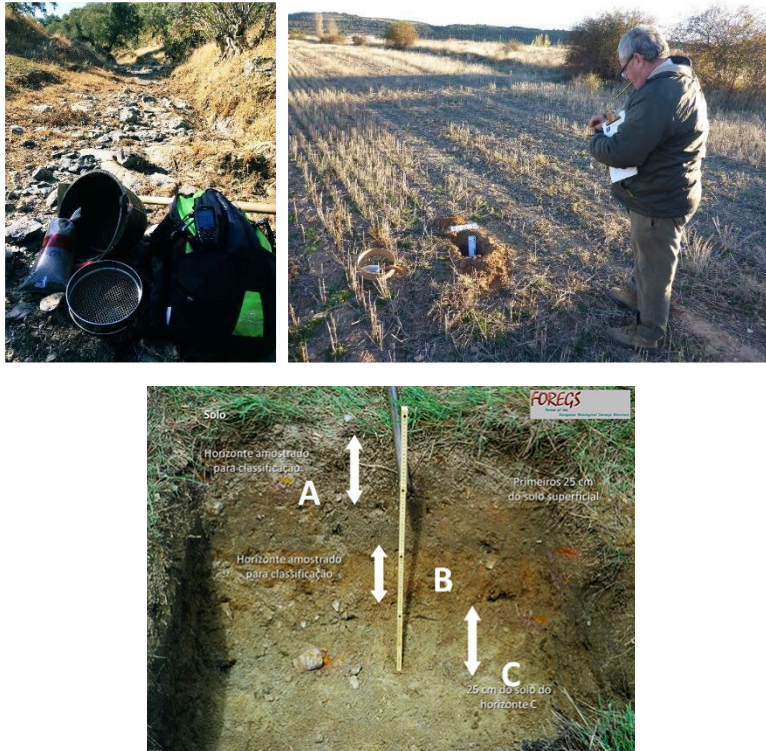


Figura 2.1.15. Sitios de muestreo en territorios de clima templado (temperado) como es el caso del Mediterráneo. Colecta de sedimentos de corriente en lecho seco y de suelo residual.

2.1.3.7.2. Territorios de clima tropical

Los climas tropicales comprenden el clima ecuatorial, monzónico, tropical seco y tropical húmedo, de tal modo que en cada uno de los territorios de América que poseen estos climas se deben adelantar levantamientos geoquímicos considerando no solo el objetivo de las investigaciones, sino también las condiciones climáticas peculiares de cada zona, las cuales definen la disponibilidad y representatividad de cada medio de muestreo (sedimentos, suelos, rocas, aguas, till, vegetación, etc.).

Las zonas con clima tropical cálido y húmedo, también denominado clima **ecuatorial en Sur América**, se encuentran generalmente en altitudes que no superan los 1000 msnm, se caracterizan por presentar lluvias constantes superiores a 2500 mm sin estación seca definida, tener durante todo el año temperaturas promedio mensuales mayores a 23°C y presentar vegetación muy frondosa y diversa de bosque tropical húmedo, más conocida como selva tropical húmeda.

En terrenos de selva tropical húmeda, el clima es el factor que más influencia tiene en la evolución y desarrollo de los suelos, en el transporte de sedimentos y en la meteorización de las rocas. En algunos de estos territorios pueden presentarse suelos ferralíticos, caolíníticos o gipsíticos, normalmente hay presencia abundante de humus y los suelos permanecen húmedos (Fig. 2.1.16).

Cuando se realizan campañas geoquímicas enfocadas a exploración de minerales, se recomienda evitar suelos muy enriquecidos en materia orgánica, debido a que ésta puede acomplejar metales y retenerlos

o, por el contrario, se puede ocasionar movilización de metales por la formación de ácidos húmicos y fúlvicos, que al fraccionar la materia orgánica contribuyen a liberar los metales que se encuentran acomplejados. Esta situación puede en algunos casos originar anomalías que no son reales para exploración de minerales (falsas anomalías), en cuyo caso el muestreo deberá realizarse siempre a mayor profundidad, preferiblemente en el horizonte B del suelo.

En territorios de selva tropical húmeda los drenajes o corrientes acuosas presentan gran caudal, son profundos y de curso bastante extendido, situación que hace imprescindible seleccionar zonas de muy baja energía para coleccionar sedimentos activos y seleccionar muy bien la granulometría de la muestra a coleccionar, la cual en muchas ocasiones no es muy fina. En el caso de la selva tropical húmeda amazónica de Colombia, en los ríos caudalosos y extensos se han coleccionado principalmente sedimentos de llanura de inundación (floodplain) y sedimentos de sobrebanca (overbank); sin embargo, en la selva tropical húmeda del Chocó biogeográfico de Colombia se han coleccionado sedimentos activos acumulados en trampas geológicas presentes en sitios de baja energía de los cuerpos acuosos.



Figura 2.1.16. Punto de muestreo en la región amazónica de Colombia en el río Amazonas, Puerto Nariño, Colombia, y detalle del perfil (160 cm) de sedimentos de llanura de inundación (floodplain) que es objeto de muestreo

Los sedimentos finos activos son bastante eficientes para exploración a una escala regional en ambientes de selva tropical húmeda y reflejan la signatura (firma) geoquímica de rocas, mineralizaciones y de fuentes de contaminación antrópica, que estén presentes en la cuenca de captación al que pertenece la muestra. De acuerdo con la densidad de la red de drenaje se puede trabajar a escala de semidetalle, a partir del cual se diseña muestreo de suelos para muestreo de mayor detalle (follow-up). Los sedimentos se coleccionan generalmente como fracción finos de malla < 80 (serie Tyler) que son coleccionados en zonas de baja energía (baja velocidad de la corriente) y/o concentrados de minerales pesados que se coleccionan en zonas en donde existan barreras naturales como troncos, rocas, etc., (Figuras (2.1.17 a 2.1.27).

En territorios con clima tropical monzónico localizados en altitudes no superiores a 1500 msnm, cuyo clima se caracteriza por temperaturas promedio superiores a 18 °C, tener régimen de pluviosidad con una estación seca muy débil (menor a 100 mm/es), presentar precipitaciones entre 2000 y 6000 mm al año, y mantener vegetación de bosque tropical seco o bosque subandino, los programas de muestreo

geoquímico pueden realizarse utilizando diversos medios de muestreo tales como, suelos que presentan horizontes bien diferenciados, sedimentos evolucionados y disponibles y afloramientos rocosos representativos y abundantes.

Finalmente, en territorios con clima tropical seco que se localizan en altitudes inferiores a 1000 msnm y se caracterizan por poseer una estación seca bien marcada y una estación lluviosa corta pero muy fuerte y mantener temperaturas superiores a los 23 °C y precipitaciones entre 700 y 2000 mm al año, la disponibilidad de suelos bien desarrollados es escasa producto de procesos patogenéticos que deben estudiarse con detalle en el caso de seleccionar suelos como medio de muestreo.



Figura 2.1.17. Sitio de alta energía, ideal para muestreo de concentrados de minerales; Proceso de concentración de minerales pesados en batea para prospección pesados. Caracaraí, RR, Brasil, selva Amazónica



Figura 2.1.18. Concentrado de minerales pesados



Figura 2.1.19. Concentración de minerales pesados en batea. Caracaraí, RR, Brasil, selva Amazónica



Figura 2.1.20. Colecta de cascajo para concentración de minerales pesados. Sitio de concentración natural de minerales pesados. Roraimópolis, RR, Amazonía brasileña.



Figura 2.1.21. Sitio de concentración natural de minerales pesados. Concentración de minerales pesados en batea.



Figura 2.1.22. Conjunto de bateas para concentración de minerales pesados



Figura 2.1.23. Colecta de cascajo en sitio de concentración natural en un drenaje de lecho seco, semiárido, Caicó, RN, Brasil. Conjunto de bateas para concentración de minerales pesados



Figura 2.1.24. Perfil de suelo laterítico (latosuelo) cubierto por sedimentos fluviales meteorizados. Cuadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. Perfil de suelo laterítico (latosuelo) desarrollado sobre sustrato granítico. Cuadrilátero Ferrífero, MG, Brasil.



Figura 2.1.25. Latosuelo desarrollado sobre roca básica en clima tropical. Cuadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. Colecta de suelo con barreno “boca de lobo”

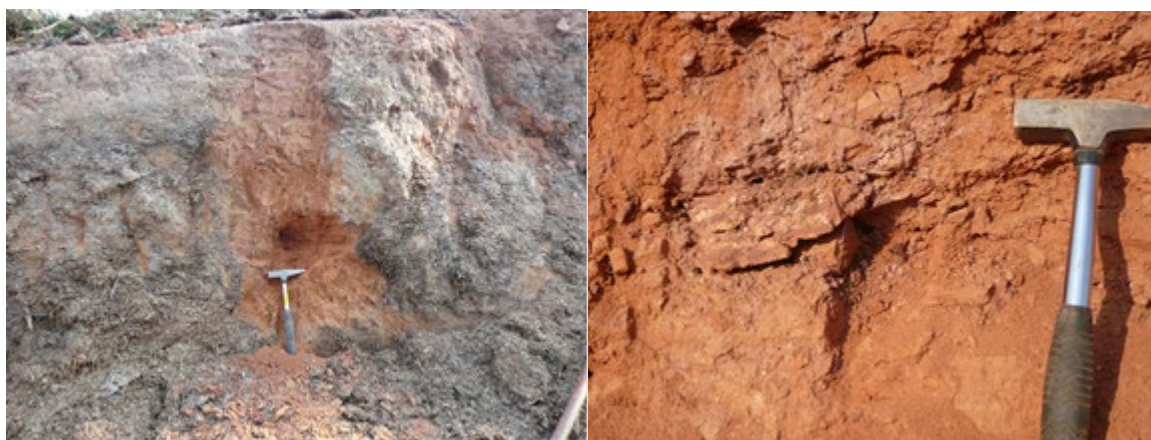


Figura 2.1.26. perfil laterítico desarrollado sobre roca granítica y sitio de muestreo en el horizonte B. Cuadrilátero Ferrífero, MG, Brasil. Perfil laterítico desarrollado sobre roca metasedimentaria. Cuadrilátero Ferrífero, MG, Brasil.



Figura 2.1.27. Colecta de suelo con barreno “boca de lobo”. Sierra verde, GO, Brasil. Perfil laterítico con desarrollo de latosuelo. Cuadrilátero Ferrífero, MG, Brasil.

2.1.3.7.3. Territorios desérticos y semidesérticos – Clima árido y semiárido

En estos territorios el desarrollo del suelo es escaso debido a la poca o inexistente humedad y vegetación y, por tanto, la recolección de suelos no es muy eficiente. En este caso se debe evaluar cual medio de muestreo es el más apropiado y representativo y adelantar el muestreo en región amplia o inclusive utilizar varios medios de muestreo, de acuerdo con el propósito del estudio. Por ejemplo, si se opta por muestrear suelos, se debe efectuar el muestreo en una región amplia, y coleccionar sedimentos o rocas simultáneamente; sin embargo, si el material de suelo no es suficiente se deben coleccionar también sedimentos (lecho seco) de corriente en drenajes de 1^{er} o 2^o orden, con lo que se asegura el conocimiento del origen del material coleccionado. Otra opción es coleccionar sedimentos de lecho seco, para concentrar minerales pesados, y de este modo evitar los efectos de dilución provocada por el transporte de partículas por acción eólica.

Por lo tanto, en las zonas aledañas a los desiertos, dado que la acción de la erosión eólica, el transporte y el depósito de estas partículas en cursos de agua es muy elevado, la colecta de sedimentos en estos ríos efímeros no debe llevarse a cabo en drenajes de orden mayor a 2, y tampoco en drenajes cuyo color del sedimento sea marcadamente más claro que la roca encajante, en éstos casos el muestreo debe realizarse en drenajes de 1er y 2do orden, dada la imposibilidad de coleccionar suelos que son prácticamente inexistentes.

Como se observa en los ejemplos referidos anteriormente, la selección del medio de muestreo geoquímico depende del objetivo del estudio, y en particular en el caso de investigación de minerales, depende en gran medida de las condiciones morfoclimáticas particulares de la zona en donde se realizará el muestreo.



En Brasil, en áreas con clima semi árido en el nordeste del país, se emplea colecta sistemática de sedimentos activos de corriente en drenajes de lecho seco intermitentes (Figuras 2.1.28 y 2.1.29). En estos sitios se coleccionan los sedimentos finos, bateados en campo en la fracción de 2 mm y posteriormente se separa la fracción de malla <80 (serie Tyler). Figura 2.1.28. Colecta de sedimentos de corriente en drenajes de lecho seco, clima semiárido. Caicó, RN, Brasil

Sectores desérticos como parte los Andes Centrales ó del desierto de Atacama han sido caracterizados a través de varios medios de muestreo (Lacassie et al, 2012): sedimentos de drenaje, en su parte superficial (hasta 15 cm de profundidad) recoleccionados desde diversos ambientes sedimentarios que incluyen cauces

fluviales activos o recientemente activos, planicies de inundación, terrazas fluviales y drenajes inactivos o 'antiguos'. Además de ello, se tomaron también muestras de llanuras o 'pampas', depresiones que se corresponden con bolsones sedimentarios que constituyen cuencas cerradas de rellenos de materiales detríticos y salinos donde por lo general no se distingue un sistema de drenaje organizado.



Figura 2.1.29. Colecta de sedimentos de corriente en drenajes de lecho seco, Tróia, CE, Brasil Colecta de sedimentos de corriente en drenajes de lecho seco, Mansidao, BA, Brasil

2.1.3.7.4. Territorios fríos, subantárticos o subpolares – Antártida.

El extremo sur del continente americano y la Antártida constituyen los terrenos que aún conservan de forma dominante las características deposicionales, morfológicas y rasgos glaciares cuaternarios. Se describen en este apartado las limitaciones y alcances para llevar a cabo un Relevamiento Geoquímico Regional bajo estas condiciones del terreno.

En la Antártida, menos del 1% de la superficie constituye áreas libres de hielo. Los Montes Transantárticos, una cadena montañosa que alcanza alturas de 4500 m y se extiende a lo largo de 3500 km divide el continente en dos grandes sectores: el Oriental y el Occidental.

En su sector Oriental, la Antártida se halla prácticamente cubierta por un gran domo o manto de hielo, con espesores que alcanzan los 4000 m. La calota glacial alcanza el mar casi en todo su perímetro y genera en el océano enormes plataformas glaciares flotantes con espesores del orden de los 400 metros y un frente de hielo casi continuo de unos 50 metros de altura sobre el nivel del mar, con escasos sitios de playas libres.

El rasgo más destacado en el sector Occidental es la Península Antártica, un archipiélago que se prolonga 1200 km hacia Tierra del Fuego (Figura 2.1.30 a 2.1.32). Se halla cubierto por un extenso manto de hielo cuyas acumulaciones promedio llegan a los 2000 m y por glaciares de valle desarrollados en los fiordos, con mayor presencia de playas y puertos naturales libres de hielo. No obstante, la Antártida Occidental posee varios picos por encima de los 3000 m.

El Tratado Antártico es el marco, la base del acuerdo internacional donde se establece que la Antártida se utilizará exclusivamente para fines pacíficos y para promover la libertad de investigación científica y la cooperación internacional con dichos fines. Los efectos del cambio climático global sobre el ambiente antártico marino y terrestre, las evaluaciones de impacto ambiental, el monitoreo de las actividades

antárticas de los distintos países, la conservación del ecosistema antártico y la evolución geológica, entre otros, son los principales temas científicos de interés de la comunidad internacional.

El relevamiento geoquímico regional y/o la definición de una línea de base geoquímica regional con muestreos de tipo sistemático para todo el territorio antártico constituye un desafío pendiente dadas las condiciones de cobertura de hielo; los principales trabajos de investigación en geoquímica en las últimas tres décadas se centraron en la caracterización de aguas y masas de hielo, de distintos tipos litológicos (petrogenéticos), estudios de metales traza en sedimentos regolíticos y suelos en proximidades de bases científicas (Gasparon & Matschullat, 2006; Sheppard et al, 2000) y geoquímica de depósitos de till basales en glaciares de valle con el propósito de contribuir al cálculo de la composición media de la corteza (Dowling et al, 2019); los anteriores ejemplifican estudios geoquímicos de alcance local, limitados arealmente a la superficie descubierta de hielo y por ello en los márgenes del continente.

A diferencia de la Antártida, en el extremo sur del Continente Americano, estudios recientes del SERNAGEOMIN (Lacassie et al, 2020) y del SEGEMAR (2021) en la isla de Tierra del Fuego establecieron la disponibilidad de distintos medios de muestreo geoquímico que permiten llevar a cabo relevamientos regionales con distintos propósitos. Tanto sedimentos de corriente, como suelos residuales, aguas superficiales, rocas, depósitos de overbank y de floodplain se desarrollan bajo una morfología glaciaria y fluvial actual que permiten la caracterización geoquímica de este tipo de ambiente.

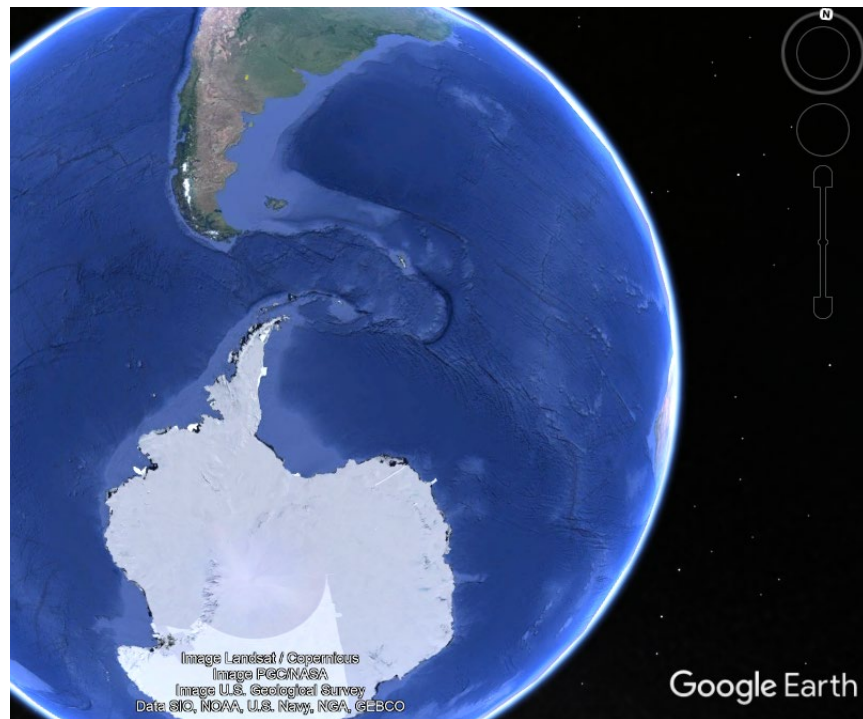


Figura 2.1.30. Vista del Continente Antártico y del extremo sur del Continente Americano (Imagen Google Earth)



Figura 2.1.31. Base Primavera, Península Antártica. Foto: Javier Peroni, Instituto Antártico Argentino (IAA)

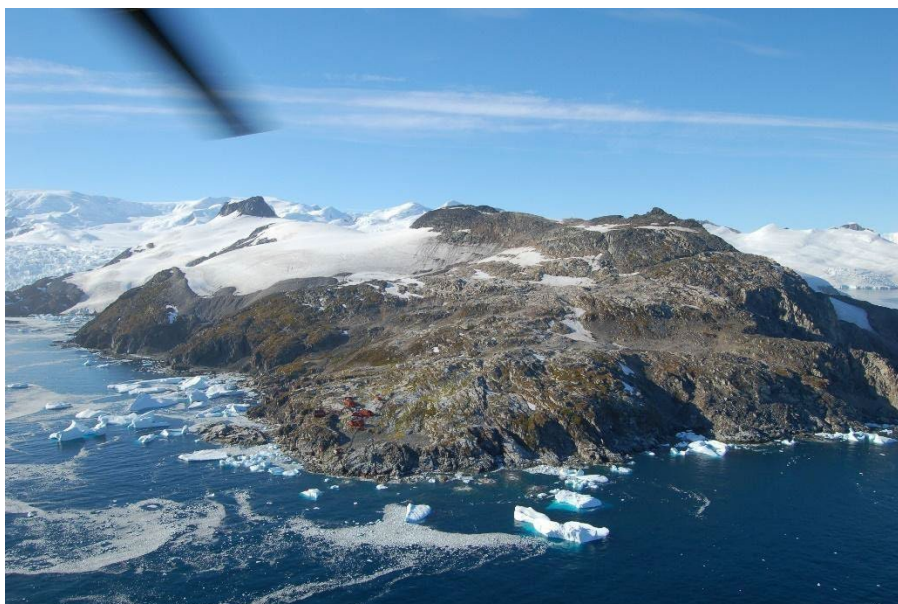


Figura 2.1.32. Base Primavera, Península Antártica. Foto: Javier Peroni, Instituto Antártico Argentino (IAA)

2.1.3.7.5. Territorios de zonas costeras con inundación periódica y vegetación tipo manglar

En este caso, hay que prestar atención a la elevada salinidad de estos terrenos, para que esta condición se tenga en cuenta para la interpretación de los resultados geoquímicos. En general, el muestreo en manglares se realiza con objetivos ambientales. Son frecuentes también los estudios de hidrocarburos de cuencas costeras que involucran muestreos en este tipo de terrenos. Debido a estas particularidades, este ambiente de muestreo también se menciona en este manual.



Figura 2.1.33. Paisaje en un ambiente costero cuya vegetación tipo manglar, puede soportar altos niveles de salinidad

En estas regiones, normalmente cálidas y húmedas, se toman muestras de suelos y sedimentos que permanecen inundados durante gran parte del año y poseen columnas de agua relativamente someras (Figura 2.1.33). Por la evaporación, se pueden encontrar óxidos de hierro en superficie y la interacción agua-sedimento-suelo está determinada por el tiempo de residencia del agua en estos lugares. Debido a la falta de horizontes definidos, este material debe ser muestreado (suelo aluvial / sedimento aluvial) a una profundidad constante en toda el área de estudio.

2.2 Medios y procedimientos de muestreo

Los medios de muestreo utilizados en la exploración mineral, valoración ambiental y cartografía geoquímica tienen una posición geográfica específica dentro de una cuenca hidrográfica. Esta posición depende del relieve y de la geoforma, por lo tanto, del transporte del material y del régimen fluvial en el cual se incluye la geometría de la red de drenaje. Un suelo residual es un suelo formado *in situ*, mientras que los sedimentos (de corriente, de sobrebanca y de llanura de inundación), se encontrarán posicionados de acuerdo con la dimensión de la cuenca de drenaje y con la antigüedad del depósito. En el esquema representado en la figura 2.2.1. se ilustra la localización de varios de los medios de muestreo situados en una cuenca de drenaje.

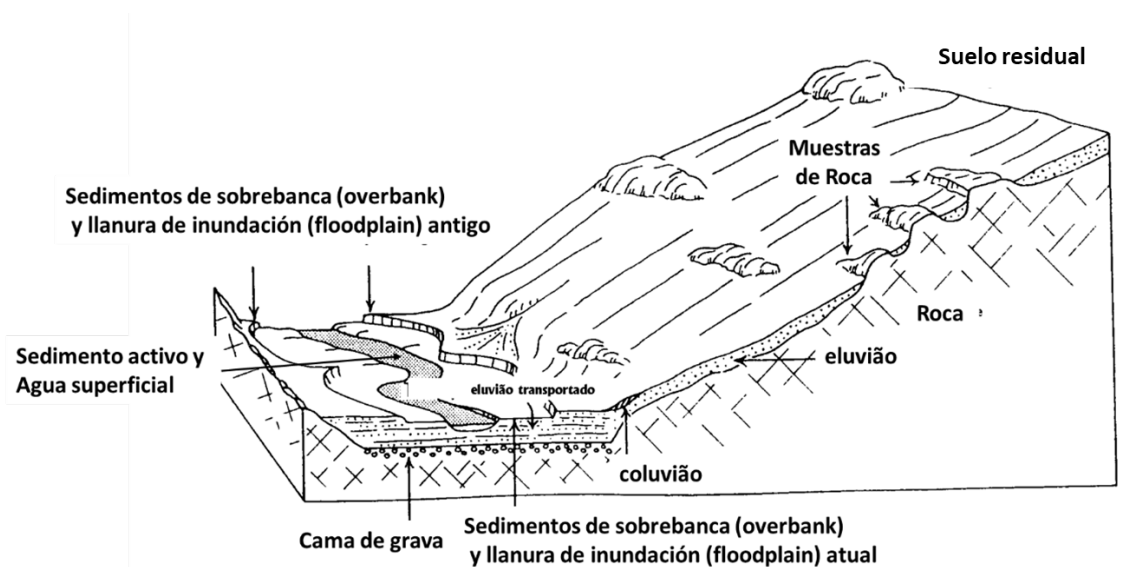


Fig. 2.2.1 - Esquema de las localizaciones de toma de muestras (Adaptado del manual de manual FOREGS)

2.2.1. Tipos de medios de muestreo

2.2.1.1. Sedimentos de sobrecarga (overbank) y llanura de inundación (floodplain)

Los sedimentos de sobrecarga junto con los sedimentos de llanura de inundación, representan el aluvión de las cuencas de drenaje que son depositados fuera del cauce principal, durante eventos de inundación, en ambientes de baja energía. Representan el aporte de la cuenca de captación del drenaje correspondiente y son depositados durante eventos de inundación; se componen principalmente por sedimentos de grano fino, limo-arcilloso y arcillo-limoso (Salminen et al., 1998; Demetriades, 2014). La diferencia entre sedimentos de llanura de inundación y sedimentos de sobrecarga está en el tamaño de la cuenca de captación que representan, es decir los sedimentos de sobrecarga son acumulados aluviales adyacentes a drenajes de bajo orden, mientras que los sedimentos de llanura de inundación se acumulan en drenajes de orden mayor, típicamente en grandes ríos (Figura 2.2.1.2., Darnley et al., 1995; Wang, 2015).

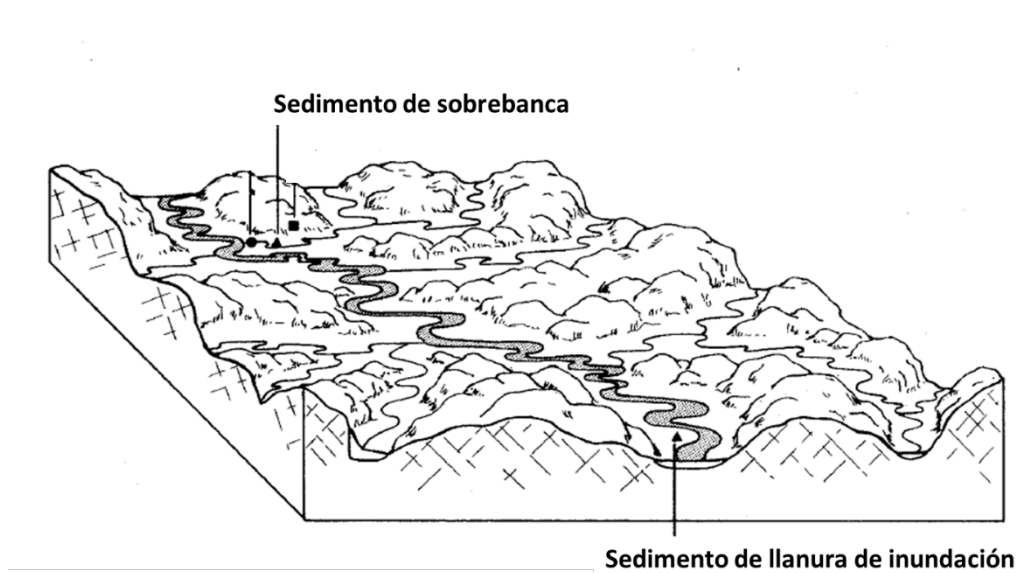


Figura 2.2.1.2 - Localización del sedimento de sobrebanca y del sedimento de llanura de inundación (esquema adaptado del manual FOREGS)

La secuencia vertical o perfil del sedimento de llanura de inundación representa el aporte en el tiempo de la cuenca de captación correspondiente (eventos de inundación). Aunque la historia o cronología de eventos que dieron origen a la secuencia del sedimento puede ser muy compleja, la porción más superficial entre 0 y 25 cm después de retirada la capa vegetal (A0-25), está generalmente influenciada por actividades antrópicas recientes y la porción más profunda (por encima del material parental o nivel freático) refleja normalmente la composición natural de la cuenca de captación; la variación entre ambas muestras permite inferir y/o medir la influencia antrópica sobre el medio.

Los sedimentos de llanura de inundación pueden encontrarse en terrazas aluviales o en la planicie de inundación activa.

El muestreo de sedimentos de sobrebanca y/o llanura de inundación es utilizado para la definición de líneas bases geoquímicas, también para delimitar zonas anómalas y regiones de dominio o concentración de elementos de interés para exploración de recursos minerales, planeación agrícola, estudios de salud y medio ambiente y para la planificación de uso del territorio (Prieto et al., 2011).

Ejemplo de Colombia

Muestreo de sedimentos de llanura de inundación para el proyecto Mapa Geoquímico de Línea de Base Geoquímica Global, desarrollado en convenio entre el Servicio Geológico Colombiano y el Servicio Geológico de Rep. Popular China.



Figura 2.2.1.3 - Toma de muestra de sedimento de llanura de inundación en muestreo de ultrabaja densidad - proyecto Mapa Geoquímico del Mundo. a) Perfil profundo (200 cm) para toma de muestra superior e inferior en la sobrebanca del río. b) Rio Tomo, municipio de La Primavera, departamento del Vichada – Colombia. c) Excavación en llanura de inundación hasta encontrar la tabla de agua.

Ejemplo de Argentina



Fig. 2.2.1.4 - Muestra de *Flood Plain* - Argentina: Analizando las muestras de la sección superior (0-25 cm) de los tres perfiles que componen una muestra de llanura de inundación, previo al embolsado. Región pampeana, Buenos Aires, República Argentina. Foto SEGEMAR

Ejemplo de España



Fig. 2.2.1.5. Muestra de Flood Plain – España. A) y B). Vista general del perfil de la llanura de inundación en Rivas (Madrid), en el proyecto Atlas Geoquímico de España. C) y D). Toma de muestra de llanura de inundación en Rivas (Madrid) en el proyecto Atlas Geoquímico de España.

2.2.1.2. Sedimentos activos de corriente

El muestreo de sedimentos activos de corriente es comúnmente usado para reconocimiento geoquímico regional, para la delimitación de áreas con potencial mineral y para definir líneas de base geoquímicas; también puede ayudar a localizar áreas contaminadas.

Los sedimentos son definidos como el material sólido, detrítico y clástico (producto meteorizado menos soluble), que es transportado por las aguas y depositado a lo largo del lecho y cauce de una corriente. Los principales tipos de sedimentos usados en estudios geoquímicos y ambientales son los sedimentos, de

sobrebanca (overbank) y/o planicie de inundación (floodplain) y los sedimentos activos (Salminen et al., 1998; Demetriades, 2014); estos últimos están representados por la carga de material en el lecho que ha sido arrastrada por una corriente de agua. Estos sedimentos reflejan el promedio de la composición geoquímica de la cuenca de drenaje y son colectados en un sitio localizado aguas arriba de su confluencia con el canal principal en una cuenca. La toma de muestras se puede hacer en cuencas de primer, segundo y de tercer orden, de acuerdo con la jerarquía de drenajes de Strahler (1964); la densidad de muestreo puede variar de acuerdo a los objetivos propuestos en un estudio o proyecto, por ejemplo, muestreo de alta densidad en exploración mineral (1 o 2 muestras por km²; BGS, 1992, 2000; Fauth et al., 1985; IGS, 1978; Prieto et al., 2011; Smith et al., 1976; Webb et al., 1978; Oliveira & Farinha, 1986), muestreo de densidad media para líneas bases geoquímicas nacionales y exploración regional (1 muestra cada 25 km²) (Prieto et al., 2011; SEGEMAR, 2001; Locutura et al., 2012), muestreo de baja densidad en proyectos de delimitación de provincias metalogénicas (1 muestra en cuencas menores a 200 km²) (Armour-Brown and Nichol, 1970; Garrett and Nichol, 1967) ó también en mapeo geoquímico con muestreo de ultrabaja densidad como el mapeo geoquímico de Europa (1 muestra cada 4500 km²) (De Vos and Tarvainen, 2006; Salminen et al., 2005a)

Ejemplo Ecuador

A lo largo de la historia de la prospección geoquímica de minerales, se ha considerado con importancia el aspecto técnico-económico en las campañas de exploración. De esta manera, se ha venido ejecutando el muestreo geoquímico, con la toma de sedimentos fluviales (Figura 2.2.1.6).





Figura 2.2.1.6. Procedimiento de toma de muestras, empaquetado y secado. a) Recolección del sedimento; b) y c) Tamizado por vía húmeda; d) Tamices y equipo de muestreo lavado luego de la toma de la muestra; e) Empaquetado y secado de muestra

Referencia: Manual de procedimiento para la prospección geoquímica de sedimentos fluviales activos IIGE-ECUADOR.

Ejemplo de Argentina



Fig. 2.2.1.7. A) Muestra de sedimento de corriente – Argentina. Tomando una muestra de sedimento de corriente. Región andino- patagónica, Tierra del Fuego, República Argentina. Foto SEGEMAR. B) Muestra de sedimento de corriente en ambiente semiárido. Calicata en la región central del lecho activo. Región Precordillera, San Juan, República Argentina. Foto SEGEMAR

Ejemplo de España



Fig 2.2.1.8. Toma de muestras de sedimentos de corriente en España. A) y B) Toma de muestra de sedimento de corriente en la Sierra Norte de Sevilla, Ossa Morena (España). C) Vista general de toma de muestra de sedimento de corriente en el proyecto Atlas Geoquímico de España en Badajoz. D) Toma de muestra de sedimento de corriente en el proyecto Atlas Geoquímico de España en Badajoz

Ejemplo de Brasil



Fig. 2.2.1.9 – Medición de pH en cursos de agua. Tamizado de sedimento activo de corriente y material utilizado en la colecta del sedimento de corriente.

Ejemplo de Honduras

Tabla 2.2.1 Muestreo de sedimentos fluviales en la zona noroccidental de Honduras, Proyecto de prospección geoquímica regional por el “Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas” año 1972.

Anomalías										
Anomalía No.	Nombre	Hoja topográfica 1:50,000	Tipo	Valores anomalos	Fondo local	Muestras anomalas	Superficie Km ²	Formaciones geológicas	Prioridades	Observaciones
23	La Florida	Florida	Pb	60-120	15	4	18.0	calizas	II	No existe anomalía geoquímica
24	Co. La Mina	Valle de Naco	Cu	41-44	18	3	14.6	metamorficos	III	
25	Joconal	Azacualpa	Cu Pb	28-132 75-438	20 22	15 3	41.8	metamórficos	III	
26	Maitán	San Marcos	Cu	32-76	12	3	7.0	calizas, metamorficos intrusivos	III	
27	Río Blanco	Copán Ruinas	Pb	50-1225	17	4	22.7	calizas, areniscas	III	
28	Río Guinse I	San Pedro Zacapa	Pb	26	44	1	4.5	calizas, areniscas, tobas	III	
29	Río Guinse II	San Pedro	Pb	50	25	1	6.0	calizas, areniscas	III	
30	El Caracol	San Marcos	Cu Pb	40-336 75-145	11 17	11 2	23.0	tobas	III	
31	La Lima	Naranjito	Pb Zn	35-45 185	19 62	4 1	12.6	calizas, areniscas	III	
32	Naranjito	Naranjito	Pb	85	10	1	10.2	calizas, tobas	III	
33	Co. Amarillo	La Iguala	Zn	164-205	70	6	34.5	tobas	III	

2.2.1.3. Concentrados de Batea

Los concentrados de batea de acuerdo con Fisher (1968) son un conjunto de minerales pesados y de partículas densas, que son obtenidos mediante un proceso de concentración gravimétrica, empleando una batea (recipiente de madera o plástico en forma de plato hondo). El proceso de separación ocurre aprovechando las diferencias de densidades entre los minerales cuando están suspendidos en el agua. La batea permite un movimiento circular del agua, que se encarga de arrastrar y echar fuera a los minerales más livianos, al tiempo que concentra en su fondo a los minerales más pesados. El tamaño de partícula de los minerales pesados, presentes en un concentrado, raramente es menor a 0.1 mm y es posible realizar estudios a través de microscopio binocular, análisis químico, entre otros.

Para la toma de muestras de concentrados de batea según BGS (2013) se buscan trampas sedimentarias, las cuales son sitios que se caracterizan por tener estructuras en el lecho rocoso, que generan la aparición de espacios donde hay pérdida de energía (disminución de la corriente) debido a cambios en la pendiente o sección transversal del cauce, lo que favorece la acumulación de partículas densas. También se dan por la presencia de obstáculos naturales en el lecho de un río o por la bifurcación de la corriente.

El muestreo de concentrados de batea es frecuentemente utilizado en exploración mineral (por ejemplo, oro, platinoides, diamantes).

Ejemplo de Colombia

Concentración gravimétrica de minerales densos mediante lavado en batea.



Fig. 2.2.1.10 - Obtención de concentrados de batea para la prospección geoquímica de oro en Colombia. a) Toma de muestra mediante concentrados de batea a partir del lavado de sedimentos de río. b) Producto de la concentración gravimétrica. Granos de oro y arenas negras compuestas por minerales densos.

Ejemplo de Brasil



Fig. 2.2.1.11. Prospector tomando muestras de concentrados de minerales pesados utilizando batea y tamiz. Cepillo para limpieza. Brasil



Fig. 2.2.1.12. Muestreo de sedimento de río y concentración de minerales pesados en tamices para exploración de diamantes, Brasil.

Ejemplo de España



Fig 2.2.1.13 Toma de muestra de sedimento de concentrado de batea en la Sierra Norte de Sevilla, Ossa Morena (España)– A), B) y C) en vía húmeda, D) en lecho seco.

2.2.1.4. Aguas superficiales

El agua superficial natural refleja la interrelación entre la geosfera, la hidrosfera y los posibles contaminantes. El agua natural, no es en general una solución homogénea y su composición química está determinada principalmente por los aportes naturales debidos a la descomposición de las rocas y de otros materiales y por aportes procedentes de actividades antropogénicas (Salminen et al., 1998; Demetriades, 2014).

Los sistemas de agua natural son soluciones complejas de electrolitos, en contacto con una amplia variedad de sólidos orgánicos e inorgánicos. Una vez en contacto con el sistema acuoso, los componentes inorgánicos sufren complejas interacciones, tanto biológicas como abióticas, las cuales van a incidir en la forma de presentación de los elementos químicos en dicho sistema (Darnley et al, 1995; FOREGS, 1998).

Entre las acciones relevantes del agua, hay que considerar por su importancia, la meteorización de rocas y minerales y las reacciones de hidrólisis. Al mismo tiempo, el agua contiene en solución sustancias que van a reaccionar con las rocas y los minerales con los que interactúa, tales como oxígeno libre, dióxido de carbono, ácido orgánicos y ácidos de nitrógeno, entre otros (Krauskopf, 1979; Salminen et al., 1998).

El amplio uso del agua por los seres vivos hace que sea necesario conocer de manera sistemática y normalizada los valores geoquímicos de elementos y especies químicas que contiene. Un principio básico en el muestreo de aguas es garantizar que las muestras colectadas, los elementos y especies químicas analizadas, reflejen la composición de las aguas en su estado natural.

Analizando los materiales de las fracciones que son meteorizadas, trasladadas y depositadas por la energía química, potencial y cinética del agua, de conformidad con sus propiedades fisicoquímicas, en diferentes lugares de la trayectoria del drenaje, se adquiere la información geoquímica requerida para reconstruir, de manera no sólo descriptiva sino interpretativa, la composición elemental de la cuenca involucrada (Golterman et al., 1983). Pueden identificarse claramente tres tipos de material transportado por el agua: 1. El material sólido separado de la fase acuosa y que se deposita fraccionado en el trayecto del drenaje en función de su densidad; 2. Las partículas que forman suspensión coloidal y que por esa propiedad logran viajar gran distancia; 3. Los analitos disueltos por reacción química de la roca y el suelo con agua, se trasladan distancias tan alejadas hasta donde el agua las lleve.

Las muestras de agua superficial se colectan de las cuencas de drenaje, donde usualmente se colectan además sedimentos activos de corriente, sedimentos de llanura de inundación y suelos residuales. El muestreo de hidrogeoquímica se utilizó en este contexto para la cartografía europea confirmando los resultados de la cartografía geoquímica de otros medios de muestreo (Salminen et al., 2005).

Ejemplo de Portugal

El mapeo hidrogeoquímico fue ampliamente utilizado para la prospección de minerales en Portugal, especialmente para el uranio en la década de 1980 del siglo XX (3ª Brigada de Prospección de Uranio, 1980).

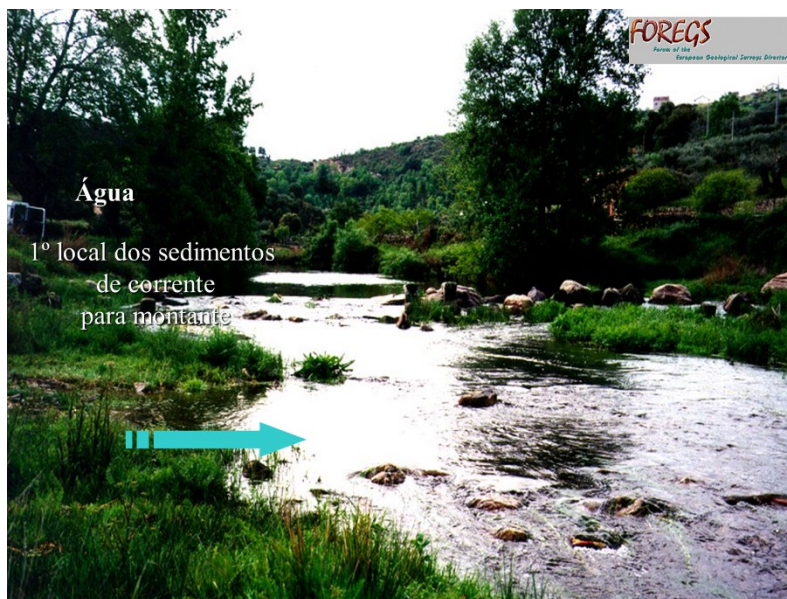


Figura 2.2.1.14 Fotografías representativas del sitio de muestreo de agua, aguas arriba del muestreo de sedimentos de corriente. Muestreo para el mapeo de Europa en la región de Trás-os-Montes, norte de Portugal

2.2.1.5. Roca

El muestreo litológico se utiliza para la clasificación de rocas, minerales y menas; para la evaluación del potencial económico de un depósito, en el cálculo de reservas, en la interpretación de procesos geológicos y también con fines de datación.

Para validar el potencial minero en estudios de detalle son utilizados los métodos de muestreo en trinchera o en canal, o incluso el muestro en la galería de la mina.

El método más común de muestreo de rocas es el linear de astillas de roca (chips); este tipo de muestreo corresponde a la toma de muestras de esquirlas, siguiendo una dirección determinada por lo general transversalmente a una estructura definida. Los intervalos de muestreo dentro de la longitud de la muestra deben ser lo más uniforme posible, teniendo en cuenta las variaciones de las rocas como la mineralogía, alteración, color, dureza, textura, estructura, etc. Estas variaciones sirven de guía visible para la elección del fraccionamiento de la muestra, lo que se justifica desde el punto de vista petrológico y geoquímico, ya que rara vez estos cambios de aspecto no están acompañados por variaciones composicionales en las rocas (SGC et al., 2014).

También son utilizados los métodos de muestreo puntual o selectivo, donde se toman muestras con el propósito de conocer las características de un punto en especial de un afloramiento, aunque al carecer de un procedimiento sistemático, este tipo de muestras pueden presentar errores ya que no son representativas de todo el conjunto rocoso.

Otro método de muestreo de rocas es el denominado panel, y se usa cuando no es posible determinar el control estructural del afloramiento a muestrear. También puede seleccionarse este tipo de muestra cuando las condiciones geomorfológicas o la posición topográfica del área a muestrear impiden otro tipo de muestreo.

La cartografía litogeoquímica siempre se ha utilizado para la prospección geoquímica detallada, sin embargo, también se usa ampliamente en la cartografía geológica para comprender los procesos geológicos de una región. Esta cartografía también está incluida en el manual de la IUGS (Demetriades et al, 2022), para su uso futuro a escala mundial. En este caso se utiliza un muestreo puntual o selectivo, escogiendo las litologías representativas de la región. (Fig.2.2.1.15).



Fig. 2.2.1.15. Ejemplo de muestreo para la cartografía global, foto de Alecos Demetriades

Ejemplo de Honduras

En el Servicio Geológico de Honduras, uno de los métodos de prospección litogeoquímica utilizados en la prospección de minerales es el muestreo de rocas en canales, el cual es muy útil para identificar anomalías en las estructuras de filones.

Exploración detallada en proyectos seleccionados



7

Realización de trincheras
en Guasucaran (Francisco
Morazan)



8

Partición de una
muestra de canal
en San Antonio
(Francisco Morazan)

Fig. 2.2.1.16. Muestreo de roca en canal en proyecto de detalle de prospección mineral.

Ejemplo de Portugal

El estudio geoquímico de las rocas granitoides que afloran en la región de Freixo de Numão (Vila Nova de Foz Côa), en el noreste de Portugal, permitió comprender mejor sus procesos de formación y su relación con la mineralización de estaño asociada (wolframita-scheelita). La geoquímica de algunos elementos traza condujo a la distinción entre los granitoides hercinianos postectónicos tardíos y mostró la posible asociación genética de la mineralización Sn-W con tipos específicos de estas rocas. Los valores más altos de Rb, Li, Nb, Rb/Sr y Nb/Zr y los más bajos de Ba, Sr, Zr, Ba/Rb y K/Rb evidencian facies póstumas de diferenciación magmática de las intrusiones y apuntan a la mayor especialización metalogenética de algunas unidades. Se definen entonces áreas más favorables para la existencia de posible mineralización, con base en criterios litogeoquímicos (Oliveira et al., 1980).

En la región de Beira Interior de Portugal, el muestreo litogeoquímico de cuarcitas Armoricanas, cuarcitas radiactivas de grano fino y la secuencia metapelítica que consiste en esquistos de grano muy fino y cuarzoques demostró que altos niveles de tierras raras estaban asociados con cuarcitas radiactivas y no a las demás litologías Ordovícicas (Oliveira, 1999).

En la región de nordeste transmontano la exploración de platinoides se realizó con muestreo de rocas, metadunitos y metaharzburgitos mineralizados con cromita.



Fig. 2.2.1.17a – Muestreo de rocas puntual para exploración de platinoides en Trás-os-Montes, Portugal. Foto de Daniel de Oliveira (2007).



Fig.

2.2.1.17b – Muestreo de rocas en canal para exploración de estaño en Ervedosa, Trás-os-Montes, Portugal. Foto de Daniel de Oliveira (2009)

2.2.1.6. Suelos residuales

El muestreo de suelos residuales es usado en programas de geoquímica aplicada como exploración mineral y también con propósitos ambientales.

El suelo es un medio poroso, estructurado y biológicamente activo que cubre la superficie continental de la tierra, el cuál ha sido generado y modificado por procesos de meteorización de sus materiales parentales y por actividades antrópicas. Se define como un sistema de componentes múltiples orgánicos e inorgánicos, constituido por fase sólida, líquida y gaseosa. Los componentes inorgánicos provienen de la meteorización de las rocas y minerales y pueden constituir más del 90% en peso en los suelos de las regiones áridas o más del 50% en suelos de turba. Para estudiar su evolución se comparan la mineralogía y geoquímica del horizonte superficial, con la del material de origen o roca madre (Otavio et al., 2007)

El suelo está compuesto por una secuencia de horizontes, cada uno de los cuáles se define como capa de suelo aproximadamente paralela a la superficie, que difiere de las capas adyacentes genéticamente

relacionadas, por sus propiedades físicas tales como color, textura y estructura, o por su composición química (Darnley et al, 1995; Salminen et al., 1998).

Esta secuencia de horizontes permite visualizar el perfil del suelo que, desde la superficie hasta el horizonte más profundo, se denominan generalmente con las letras A, B y C. La roca o material subyacente se denomina horizonte R o “roca parental”.

El horizonte A hace referencia al horizonte mineral (con carbono orgánico inferior al 18% en peso) que se desarrolla en la superficie. En este horizonte se presenta acumulación in situ de materia orgánica humificada, totalmente mezclada con la fracción mineral, y con aportes y propiedades resultantes de actividades antrópicas (agricultura y ganadería) y de precipitación atmosférica. En el caso de horizonte A0-25, se hace referencia a la profundidad hasta la cual se toma la muestra del perfil superficial.

El horizonte B es el horizonte mineral que subyace al horizonte A y cuyo color de estructura rocosa original ha sido alterado por adición de materia orgánica, arcilla, hierro, sesquióxidos, yeso, sílice u óxidos. El horizonte C es el horizonte mineral poco alterado por procesos pedogenéticos. En la parte más profunda del perfil se encuentra el material parental, a partir del cual se generan los suelos residuales (Salminen et al., 1998).

Ejemplo de Colombia

Muestreo de suelos residuales para la determinación de los contenidos de Cd y otros elementos potencialmente peligrosos, en suelos cacaoteros en el Municipio de San Vicente de Chucurí, departamento de Santander – Colombia; desarrollado por la Dirección de Recursos Minerales del Servicio Geológico Colombiano.

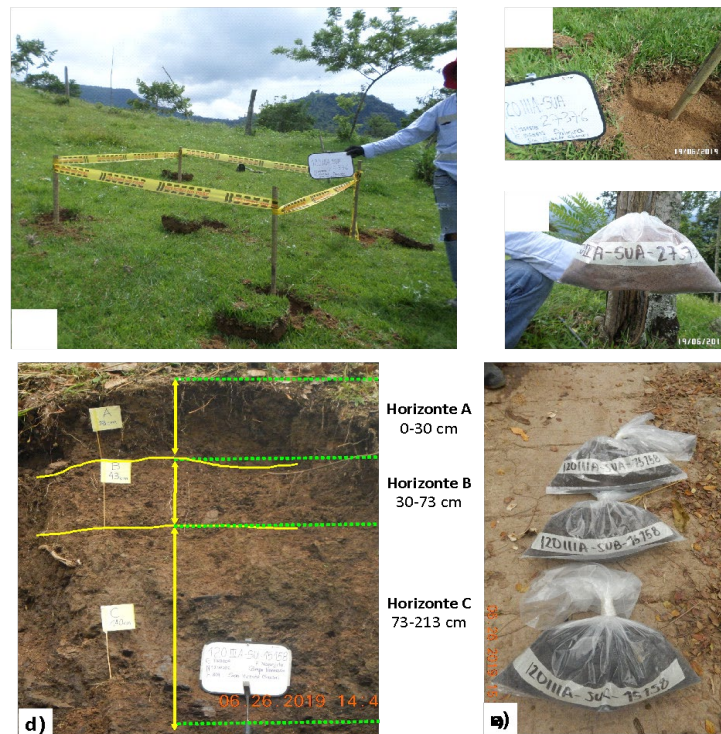


Figura 2.2.1.18 Fotografías que ilustran el muestreo de suelos residuales. a). Punto de muestra de *topsoil* compuesta por 5 submuestras. b). Remoción y desecho de la capa vegetal en cada sub muestra. c). Compósito de muestra. d) Punto de muestra de perfil modal de suelo, donde se colecta una muestra independiente por cada horizonte. e) Muestra de horizonte de suelo.

Ejemplo de Brasil



Fig. 2.2.1.19 – Recolección de muestras de suelo mediante barreno “boca-de-lobo”. Roraima, Brasil.

Ejemplo de Portugal- Cartografía de suelos para el mapa de Europa (FOREGS)

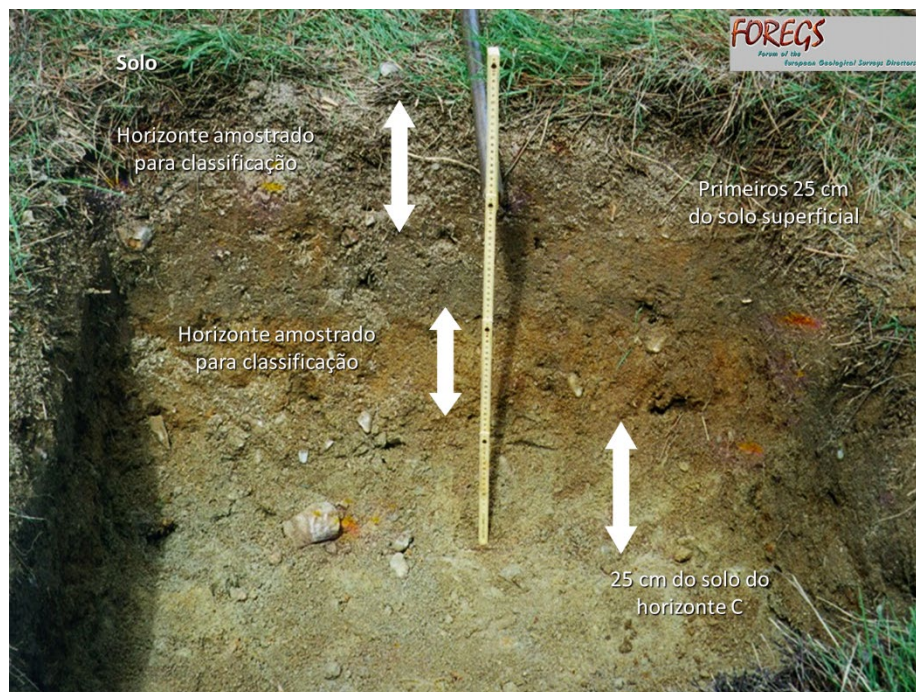


Fig. 2.2.1.20 - Fotografía representativa del procedimiento de muestreo de suelos residuales con el fin de cartografiarlos a escala europea. Muestreo en la región de Minho, norte de Portugal.

Ejemplo de España

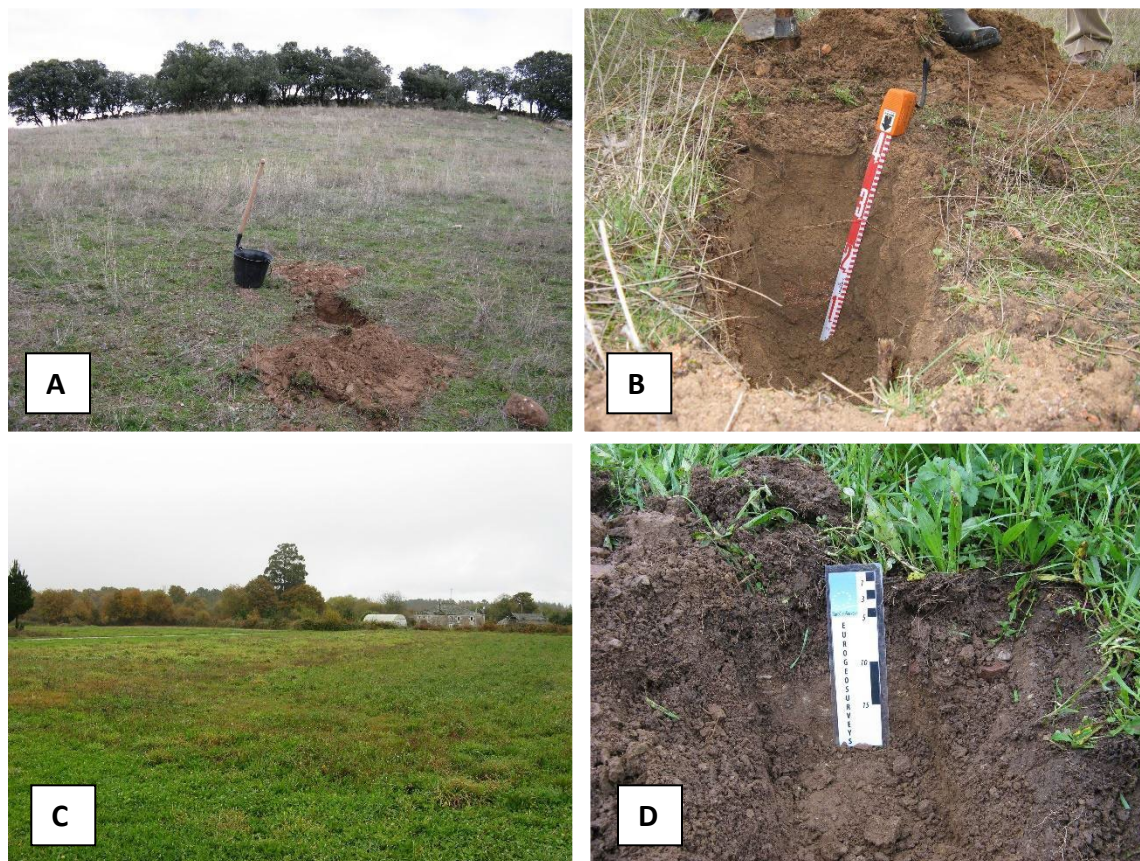


Figura 2.2.1.21 Fotografías que ilustran el muestreo de suelos residuales. A). Vista general de una toma de muestras de suelos residuales en el proyecto Atlas Geoquímico de España en Ávila (España). B). Detalle del pocillo de una toma de muestra de suelo residual en el proyecto Atlas Geoquímico de España en Ávila (España). C). Vista general de una zona de muestra de suelo en el proyecto GEMAS en Galicia (España). D) Detalle del pocillo de una toma de muestra de suelo residual en el proyecto GEMAS en Galicia (España).

Muestreo para exploración mineral

Ejemplo de Portugal

Investigación de los halos geoquímicos sobre el yacimiento Lombador y Semblana en el área minera de Neves Corvo, Faja Pirítica en Alentejo, Portugal - (Proyecto EXPLORA - ALT20-03-0145-FEDER-000025 en la región de Neves Corvo).



Figura 2.2.1.22 - Fotografías representativas del procedimiento de muestreo de suelo residual con fines de prospección mineral. a) Fotografía de paisaje que abarca el área a muestrear; b) sitio de muestreo con azada, tamiz con abertura de 5 mm y bolsa kraft (ejemplo de muestreo para Mobil Metal Ions - MMI) en la región minera de Neves Corvo, Alentejo

Se tomaron varias muestras: 1º para análisis total y extracciones parciales, 2º para Mobil Metal Ion (MMI).

Suelos esqueléticos, correspondientes al horizonte mineralizado donde se realizó el muestreo a unos 20 a 40 cm de profundidad. Muestra recolectada, colocada en un tamiz de 5 mm de apertura en el campo para eliminar los fragmentos superiores a ese tamaño.

Ejemplo de Chile

Muestras de relave minero:

Los relaves mineros corresponden a una acumulación de residuos derivados de la actividad minera, incluyendo el procesamiento de rocas, sedimentos y/o minerales. Está constituido principalmente de mineral molido, agua y otros compuestos, que dan lugar a un depósito estratificado de arenas y limos. Al ser desechos mineros, los relaves suelen tener concentraciones de metales como As, Cd, Pb y Hg, los que pueden migrar en el medio ambiente por efecto de la erosión del viento, o mediante la interacción con el agua, y generar drenajes ácidos que pueden contaminar tanto los suelos y ríos cercanos como las aguas subterráneas.

Las muestras recolectadas desde relaves mineros se denominan **compósitos de sedimento de relave** y corresponden a un compósito de sedimentos obtenidos desde la superficie del relave (hasta una profundidad máxima de 15 cm) y con un espaciamiento de entre 2 a 5 m, a lo largo de un tramo recto de entre 20 a 100 m.



Fig. 2.2.1.23. - Fotografía de recolección de un compósito de sedimento de relave minero. Corresponde al punto de muestreo FE-467, de la Hoja Copiapó, norte de Chile. Fotografía de Felipe Astudillo. Se destaca el contacto entre el relave (sobre la línea segmentada) y parte del lecho de una quebrada seca (bajo la línea segmentada).

Muestreo de pampas

Por pampa se entiende cualquier planicie aluvial o llanura de baja pendiente con sistemas de drenaje poco definidos o inexistentes (Fig. 2.2.1.24).

Las muestras recolectadas desde este ambiente sedimentario se denominan **compósitos de sedimento de pampa**. Corresponden a sedimentos recolectados hasta una profundidad máxima de 15 cm y con un espaciamiento de entre 2 a 5 m, a lo largo de un tramo recto de entre 20 a 100 m.



Fig. 2.2.1.24. - Fotografía del ambiente sedimentario del tipo pampa. Corresponde al punto de muestreo CR-508, ubicado en la Pampa Portezuelo, Hoja Taltal, norte de Chile. Fotografía tomada por Catalina Ramírez.

2.2.1.7. Otros – Contaminantes orgánicos. Plantas. Geoquímica penetrativa.

Muestreo de suelos para análisis de componentes orgánicos con objetivos de diagnóstico ambiental

Las primeras cartografías geoquímicas con enfoque medio ambiental tenían como máximo objetivo conocer los contenidos y distribuciones de elementos químicos inorgánicos en los materiales superficiales, ya fueran suelos, agua, plantas etc. Pronto se ha tomado conciencia de que gran parte de los contaminantes que amenazan la salud de los ecosistemas son compuestos orgánicos producidos por procesos industriales diversos, pero también por la industria química, la combustión de hidrocarburos, el tráfico, las combustiones que se producen en los incineradores de residuos urbanos, y que se dispersan por el viento en el medio atmosférico y se depositan a cierta distancia en los suelos. Las emisiones de todas estas fuentes de contaminantes orgánicos, así como los que se producen también en alguna medida en los incendios de nuestros bosques, son los focos de contaminación graves que afectan a nuestros suelos. Por ello, muchas de las campañas de cartografía geoquímica actuales toman muestras de suelo para la determinación de contenidos de varias familias de contaminantes orgánicos como **PAHs, PCBs, BTEX, Dioxinas, Furanos**, etc. El problema de conseguir llevar a término estas campañas radica en los elevadísimos precios de los análisis de este tipo de componentes en comparación con los análisis de

inorgánicos. Dado los muy bajos contenidos a partir de los cuales este tipo de productos son peligrosos (valores ligeramente por encima de los límites de detección de las dioxinas ya constituyen anomalías a tener en cuenta) el manejo de los suelos que se van a estudiar (durante la toma, la preparación o el análisis) debe realizarse muy cuidadosamente; los protocolos relativos a esas operaciones son muy estrictos.

Plantas

Algunos estudios resumen los principios de la utilidad del muestreo de plantas para propósitos de prospección mineral como en Kovalevskii (1987) y Brooks (1987) con compilaciones posteriores de Brooks (1992) y Brooks et al. (1995). Más recientemente, también se han muestreado plantas con fines de diagnóstico ambiental (Batista et al., 2007) y han demostrado ser particularmente importantes en proyectos de fitoestabilización (Santos et al., 2019).

Se debe elegir una planta de estudio cuya representatividad sea suficientemente grande en la región a muestrear. La planta, designada como planta de diagnóstico, debe recogerse preferentemente cerca del sitio de la muestra de suelo.

Ejemplo de Portugal

Muestreo de *Cistus ladanifer* L. para determinar Cu y Sn y su distribución de abundancias en la región de Neves Corvo (Batista et al., 2007).



Fig. 2.2.1.23 Muestreo de *Cistus ladanifer* L. en la región de la mina de Neves Corvo (Batista, 2003)

Muestreo de geoquímica penetrativa para la prospección mineral

Una de las principales limitaciones de las técnicas geoquímicas radicaba, tradicionalmente, en su escasa penetrabilidad, siendo eficaz para la detección de yacimientos relativamente superficiales (200 o 300 m). Esta limitación fue en parte superada por el mayor conocimiento de los halos de dispersión primaria de algunos tipos de grandes yacimientos (epitermales, pórfidos cupríferos, etc.) debido a que por las amplias dimensiones de sus envolventes de dispersión, podían ser detectados a profundidades algo mayores. Pero los yacimientos que quedan por descubrir, los más difíciles de buscar en suma, añaden frecuentemente otra dificultad a la de su profundidad, la de estar **separados de la superficie por recubrimientos o pantallas alóctonas**, que no transmiten las dispersiones geoquímicas asociadas del yacimiento a la superficie; un ejemplo de este tipo de yacimiento lo tenemos en Las Cruces (Sevilla, España), relativamente profundo, a algo más de 120 metros, pero con una pantalla de margas de ese espesor y de edad muy posterior, del Mioceno.

En los últimos 15-20 años, se han desarrollado, fundamentalmente en Australia y Canadá, sucesivas técnicas diseñadas para reconocer o detectar las anomalías muy tenues y sutiles denominadas de forma genérica como geoquímicas penetrativas. Estas técnicas se basan en la detección en la vertical de los iones metálicos, gases y compuestos de hidrocarburos provenientes de la descomposición de microorganismos asociados a la degradación de sulfuros, variaciones de pH, variaciones de concentración de elementos del grupo de los halógenos... entre otros métodos. Para detectar estos factores se utilizan medios de muestreo como suelos, sedimentos y plantas en los que se pueden reflejar estas leves variaciones de contenidos que permiten descubrir yacimientos minerales en profundidad. Estas técnicas se basan casi todas en **lixiviaciones selectivas de las muestras** y análisis de gran sensibilidad por ICP-MS.

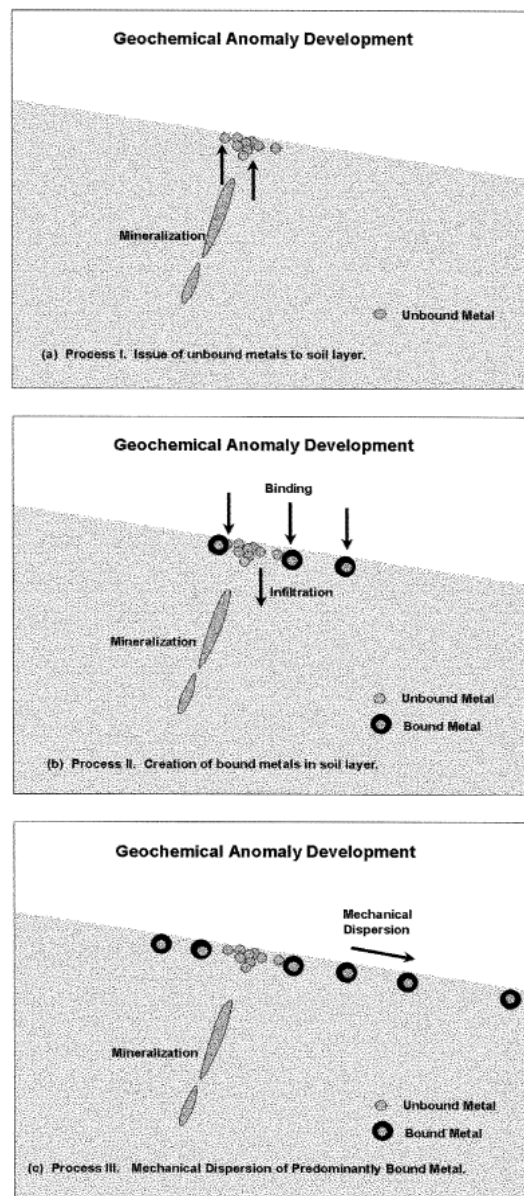


Fig. 2.2.1.24 - Modelo conceptual de formación de las dispersiones asociadas a mineralizaciones profundas (Mann et al., 1995)

Las técnicas más utilizadas son las siguientes:

- Ión metálico móvil (MMI)

Es la más contrastada de todas las técnicas, por ser la más antigua. Aísla los iones metálicos activos que han sido débilmente adsorbidos por las partículas finas del suelo (Mat. orgánica, arcillas, hidróxidos de Mn-Fe). El ión metálico móvil, se define como un flujo muy tenue de iones derivados de la mineralización metálica, que tiende a ascender muy lentamente desde el yacimiento a la superficie, atravesando pantallas de naturaleza diferente a su encajante, por efecto de diversos mecanismos y causas, como las diferencias de electropotencial. Los iones ascendidos en su vertical (proyección en la vertical del supuesto yacimiento), son captados en superficie por fases minerales específicas del suelo, **con gran capacidad adsortiva** (arcillas, materia orgánica, hidróxidos amorfos de Mn y/o Fe). Los ataques selectivos tienen como función **separar las fases minerales del suelo elegidas** que se suponen que captan la mayor parte de la concentración (siempre muy pequeña) del ión, para analizar y determinar en ellas las concentraciones de metales que pueden proceder de un supuesto yacimiento o las concentraciones muy inferiores de las rocas del entorno (Mann et al., 1995)

- Lixiviación encimática

Es un método eficiente para hallar mineralización oculta y ciega a través de espesores considerables de pantallas exóticas (rocas volcánicas más jóvenes, recubrimientos de materiales muy diferentes, etc). Las trampas para captar a los elementos que migran hacia la superficie incluyen a óxidos de Mn, arcillas y materia orgánica. Existen diversos tipos de extracción selectiva que afectan a diversos tipos de trampas para liberar la señal de la mineralización. Una lixiviación más débil será requerida para aislar la señal de mineralización de la del recubrimiento. El reconocimiento de pautas es la clave para la interpretación de esta técnica, ya que las pautas anómalas pueden ser diferentes de las de la geoquímica tradicional. Este tipo de extracciones selectivas han demostrado ser útiles tanto en medios ácidos como alcalinos, y son usadas en todo tipo de entornos.

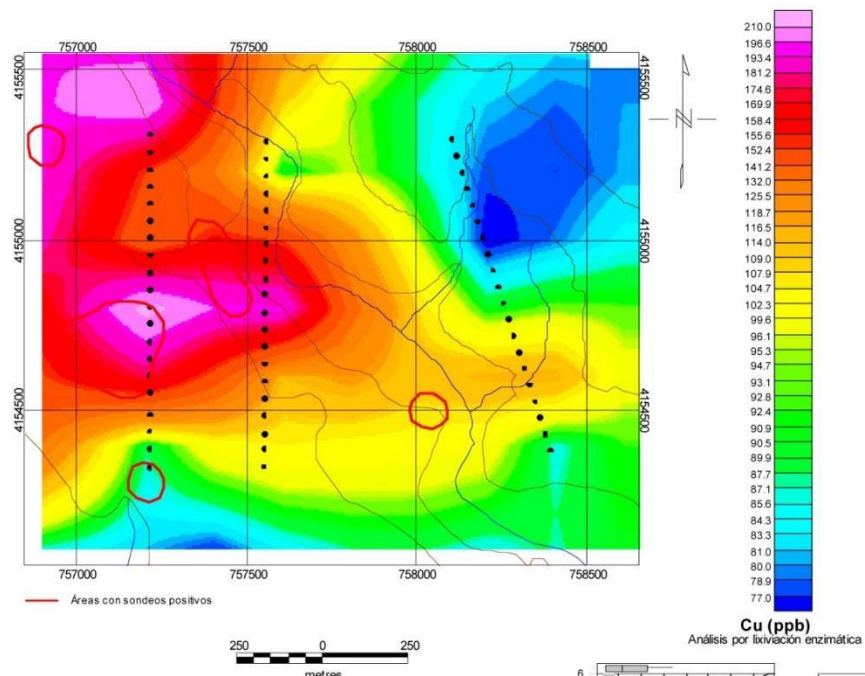


Fig. 2.2.1.25. Respuesta del yacimiento de Las Cruces al ensayo de Lixiviación enzimática en suelos realizado por el IGME en 2008.

- Soil Gas Hydrocarbon (SGH)

SGH es una de las técnicas emergentes más utilizadas y está pensada para detectar yacimientos profundos, hasta una profundidad de 1.000 metros. Rasgo más importante: se basa en los espectros de la materia orgánica del suelos, que incluye hidrocarburos emigrados hacia la superficie, como vestigios de la composición de los restos de bacterias que se alimentaban de los materiales metálicos de las mineralizaciones en fondos marinos, y en otros ambientes en los que se haya podido formar la concentración metálica (Sutherland, 2011).

- SGH detecta 162 hidrocarburos pesados, en el rango de carbonos C5 a C17. Estos carbonos pesados provienen de la descomposición de bacterias que han podido usar a la mineralización como fuente de alimentación. Puede aplicarse a muy variados tipos de muestra (suelos, arenas, humus, turba, etc.)
- Existen una serie de modelos de SGH que han sido definidos como firmas de concentraciones de Cu, Au, Ni, Zn, y otros modelos definen tipos de yacimientos (VMS, IOCG, SEDEX)
- SGH es muy discriminante, particularmente entre estructuras mineralizadas y estructuras estériles. El SGH es ciego para el contenido inorgánico de las muestras y no refleja anomalías desplazadas o movilizadas o efectos “pepita”. Diversos estudios, realizados por centros de investigación canadienses, laboratorios, y empresas mineras, han puesto de manifiesto que SGH suministra generalmente anomalías relacionadas con objetivos concretos y fácilmente identificables.
- La determinación de los espectros de composición de hidrocarburos se produce tras una extracción específica y el análisis en la fracción extraída por técnicas de cromatografía gaseosa muy sensibles, con límites de detección de hasta partes por billón.

- Geoquímica de complejos órgano-sulfurados (OSG)

Se ha venido poniendo a punto desde 2008. Se basa en el análisis de 105 compuestos con azufre que provienen de la descomposición de bacterias que se habrían podido nutrir de los sulfuros que constituyen la mineralización buscada. Ha demostrado ser, como muestran datos publicados y referencias de uso por empresas mineras, un excelente complemento para las determinaciones de SGH, con las cuales suministra dianas muy precisas para proseguir la prospección.

2.2.2. Procedimientos de toma de muestras

Los procedimientos aquí presentados son orientativos y existen otros también válidos que no difieren en lo esencial.

2.2.2.1. Sedimentos de bancada y sedimentos de llanura de inundación

Material:

- Pala con mango sin pintar
 - Espátula
 - Pala de plástico
 - Barreno
 - Martillo
 - Cinta métrica de madera de 2 metros
 - Rotulador permanente
 - Mapas y GPS
 - Cajas de plástico para los sacos de muestras
 - Sacos para el muestreo
- Definir el sitio de muestreo en la planicie de inundación de la cuenca seleccionada en una sección en la cual se evidencie la ocurrencia de inundaciones periódicas recientes. En el sitio seleccionado para la toma de las muestras y a una distancia prudente del borde del río (5 a 10 m), se hace un apique y se examina la secuencia del sedimento de llanura de inundación. El punto seleccionado debe poseer una sección apropiada, depositada en un ambiente de baja energía, que contenga varias capas de material de granulometría fina, ej. limo-arcilloso, arcillo - limoso. Es importante tener en cuenta que los guijarros y los lechos de gravas indican ambientes de media a alta energía, respectivamente y no son apropiados para este tipo de muestreo.



Fig. 2.2.2.1. Río La Miel. Panorámica del sitio de muestreo localizado sobre la margen izquierda del río. Dirección E – W y apique de 2.0 m.

- Marcar el sitio de muestreo en el mapa topográfico de campo. Se recomienda escribir el número identificador de la cuenca sobre el mapa, cerca al punto de muestreo. Adicionalmente, se deberá colocar en un sitio visible, una cinta con el respectivo código de la muestra recolectada, lo anterior para facilitar las labores de reconocimiento posterior.
- Tomar las coordenadas geográficas con GPS y si es posible la altitud con altímetro *Thommen* o de precisión; anotar los datos obtenidos en el formato de captura de información en campo para muestreo de sedimentos de planicie de inundación y completar los detalles descriptivos del sitio de muestreo. En las observaciones, referenciar un sitio fácilmente reconocible en campo (ejemplo: a 200 m al NE de la escuela NN).
- Colocar la etiqueta con el identificador de la muestra sobre la bolsa plástica de muestreo y colocar protector de cinta transparente (5 cm) para evitar pérdida de la numeración. Opcionalmente, en caso de no disponer de etiquetas, colocar el identificador sobre la bolsa plástica y protegerlo con cinta transparente.
- Retirar la capa orgánica superficial (humus o litter) y construir un apique de 1.00 x 0.80 x 2.00 m de profundidad máxima. En caso de encontrar la tabla de agua o estratos de gravas antes de los 2.00 m, se tomará este nivel como el más profundo del apique, siempre y cuando se encuentre por debajo de los 60 cm. Si no se cumple lo anterior se debe buscar un sitio alternativo para hacer el apique de muestreo.
- El uso del barreno es una alternativa viable; 3 alícuotas separadas no más de 50 metros entre sí como vértices de un triángulo integran una muestra superficial y una muestra profunda.
- Levantar la columna o descripción del perfil del depósito aluvial, mostrando la sucesión de los diferentes estratos del perfil, y describir de manera detallada los materiales que componen las diferentes capas, haciendo énfasis en aspectos tales como color, contenido de materia orgánica, textura, composición en relación al tamaño de grano y composición (cuarzo, feldespato, fragmentos líticos, etc.), tal y como se describe en el formato de captura de información en campo para muestreo de sedimentos de planicie de inundación.



Fig. 2.2.2.2. Depósito aluvial, con las marcas de los perfiles de sedimentación. Nótese el nivel de gravas en la base del perfil.

- Tomar fotografías del sitio de muestreo y de acercamiento del perfil de sedimentación. En cada sitio de muestreo se deberán tomar mínimo dos fotografías: la primera que presente una vista general del sitio de muestreo con relación a la corriente/ canal del río y la segunda de un acercamiento del apique o del perfil de los horizontes de muestreo. Antes de tomar la segunda fotografía, marcar con una herramienta apropiada (espátula) las capas del sedimento aluvial, si se pueden diferenciar, señalar los límites de los estratos y sus características estructurales y texturales. Colocar sobre una de las paredes del apique (la que mejor muestre las capas), una cinta métrica de madera coloreada alternadamente por secciones (cada 10 cm) como escala de referencia que cubra todo el perfil. Si se considera necesario, por existir rasgos geomorfológicos, geológicos o texturales de interés, pueden tomarse más fotografías, registrando la numeración correspondiente en el formato de Captura de Información en campo para muestreo de sedimentos de planicie de inundación.
- Colectar las muestras, de tal manera que sean representativas de toda la sección del estrato seleccionado (0.80 x 1.00 m). Recolectar primero la muestra profunda y posteriormente la superficial: Se limpia el perfil y se colectan 2 kg de sedimento de llanura de inundación, de la capa más profunda alcanzada (los 25 cm más profundos), sobre el nivel de gravas o de la tabla de agua; anotar en el formato de captura de datos de campo la profundidad del intervalo muestreado y marcar la capa muestreada en la columna respectiva. La muestra profunda deberá idealmente ser recolectada en la capa de sedimentos finos que esté inmediatamente sobre el lecho de grava, sin embargo, esto no siempre es posible, de tal modo que se debe muestrear la capa más profunda (material de granulometría arcillosa- arcillo limosa) alcanzable (hasta los 2 m) y que no tenga signos evidentes de actividad antrópica tales como plásticos, en cuyo caso es preferible proceder a abrir un nuevo apique para la toma de la respectiva muestra.
- Opcionalmente, en una bolsa aparte, debidamente rotulada, recolectar 2 kg de muestra, del estrato que presente mayor contenido de material orgánico (opcionalmente carbonáceo, turba, etc). La muestra debe ser tomada del fondo (horizontal) del estrato seleccionado, asegurándose de que éste no tenga evidencias de alteración o exposición al aire. Anotar la profundidad y el

espesor del estrato muestreado y marcar la porción muestreada en la columna respectiva. Esta bolsa debe quedar herméticamente cerrada, evitando contacto con el aire, puesto que será usada para datación.

- Posteriormente se recolecta la muestra superficial en el mismo perfil de la muestra profunda tomando 2 kg de sedimento superficial, entre 0 y 25 cm (después de retirar el material vegetal, el humus y el litter donde estén presentes), de tal manera que sea representativa de toda la sección del estrato seleccionado (0.25 x 0.80 x 1.00 m). Si el espesor de la capa superficial del sedimento es menor de 25 cm, anotar su espesor y el número de capas muestreadas para completar los 25 cm, en la ficha de observaciones de campo. Marcar la porción muestreada en la columna respectiva.
- Opcionalmente tomar la lectura del detector de centelleo, en el mismo perfil en el cual se colectaron las muestras, siguiendo la instrucción para el manejo correcto del equipo. Registrar el resultado de la lectura en el formato correspondiente efectuando un barrido con el detector a lo largo del perfil y registrar si existen cambios entre las capas.
- Empacar cada muestra, cerrando la bolsa que la contiene con un nudo y luego sellando con cinta transparente de 2.5 pulgadas. Colocar cada bolsa sellada dentro de otra bolsa de polietileno y amarrar ésta última con un nudo, para evitar contaminación cruzada durante el transporte. Sellar la segunda bolsa completamente con cinta transparente (2.5 pulgadas) y marcar nuevamente con el identificador de la muestra, o colocar la etiqueta de identificación, protegiendo la marca con cinta transparente (2.5 pulgadas) para evitar pérdida de la numeración. Colocar las muestras en una caja de plástico para su transporte al laboratorio.
- Volver a llenar el apique o zanja abierta, con el mismo material retirado al abrirlo.
- Después de recolectar cada muestra, limpiar completa y cuidadosamente el equipo de muestreo.
- En el caso de muestrear un perfil descubierto, se deberá seleccionar una porción que presente el perfil completo original (no derrumbado). Proceder a la limpieza de la superficie expuesta del perfil, retirando 30-40 cm de espesor del material expuesto. Posteriormente se procederá al diligenciamiento del formato de campo, incluyendo la descripción de los estratos del perfil y seguidamente se tomarán la muestra profunda primero, la muestra para datación y finalmente la muestra superficial, tal y como se describe en los numerales

Evitar posibles focos de contaminación como:

- Líneas eléctricas.
- Latas u otros objetos que sean foco de contaminación aguas arriba de la muestra.
- Vías de comunicación, siempre que sea posible es preferible tomar las muestras aguas arriba de las vías.

2.2.2.2. Sedimentos de corriente

Material:

Muestra en lecho húmedo

- Guantes hasta la altura de los codos
- Tamices con abertura de 0,18 mm (para prospección mineral)
- Tamices con abertura de 5 mm
- Embudo

- Pala sin pintar
 - Recipiente de plástico (balde) ó fondo del tamiz donde la muestra será tamizada en el lugar de recogida de la misma
 - Sacos donde se colocarán de 500g a 1kg de material fino <0,180 mm u otro que se considere adecuado para el objetivo
 - Rotulado permanente azul o negro
- Al llegar al sitio seleccionado para colectar la primera sub-muestra, se debe registrar su localización exacta mediante el uso del equipo GPS. Registrar la información en el formato de captura de datos de Campo para Sedimentos Activos.
 - Tomar la altitud con altímetro y anotar los datos obtenidos en el formato de captura de datos de Campo y diligenciar la totalidad de los campos con la información del sitio de muestreo.
 - Verificar las coordenadas y registrar cada sitio de muestreo en los mapas topográficos respectivos. Se recomienda marcar el número de identificación completo de la muestra sobre el mapa, cerca al punto de localización del muestreo.
 - Opcionalmente antes de proceder a la colecta de la muestra, se debe tomar y registrar el pH y la temperatura del cuerpo acuoso (°C), en el sitio seleccionado para colectar la primera sub-muestra.
 - Cabe aclarar que se debe colectar el material de granulometría más fina que esté presente en el lecho de la corriente. El sedimento fino a muestrear debe estar en contacto con el agua de la corriente.
 - La primera sub-muestra es colectada en el punto más bajo, cerca del ápice de la cuenca, mínimo 50 m de distancia aguas arriba del punto de confluencia de la corriente muestreada con la corriente de orden mayor (afluente receptor).
 - Tamizar para remover el material grueso de la muestra, pasando cada sub-muestra a través de un tamiz plástico de nylon con la apertura elegida para tamizar en el campo.



Fig. 2.2.2.3 - Pretamizaje en campo de sedimentos activos de corriente

- Registrar en el GPS los *waypoints* o sitio de colecta de muestra, identificándolo con el código del sitio de muestreo.
- Identificar la muestra colectada con el código correspondiente al sitio de muestreo programado, usando etiquetas autoadhesivas, marcadas con un marcador de tinta indeleble, de color negro o impreso en computador.
- Colocar la etiqueta, sobre la bolsa plástica de polietileno transparente externa y cubrir la etiqueta con cinta transparente gruesa, para evitar que se borre el código.
- Proceder a anudar y sellar la bolsa usando cinta transparente o zuncho, de tal manera que se evite la pérdida de muestra y la contaminación de la misma.

- En los sitios seleccionados para tomar muestras de control de calidad (duplicados de campo), se debe coleccionar simultáneamente la muestra original y la muestra duplicado, en cada sitio de sub-muestra, hasta coleccionar 2.5 a 3 kg por muestra, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Registro fotográfico

Al momento de la toma de la muestra, se debe realizar el registro fotográfico de las características generales del sitio de muestreo, de acuerdo a las siguientes indicaciones:

- Panorámica general del drenaje muestreado, mostrando el lecho del drenaje, tanto aguas arriba como aguas abajo.
- Fotografía de la muestra recolectada.
- Fotografía del rotulado y empaquetado de la muestra ya coleccionada, donde se vea claramente la identificación de la misma, ya con su rótulo.
- Fotografía de los diferentes fragmentos líticos –rodados- que se encuentren en el sitio de muestreo.
- Si existen rasgos de interés, pueden tomarse más fotografías que incluyan, por ejemplo, los afloramientos presentes.

Todas las fotografías deben incluir escala gráfica, registro de la fecha y hora de la toma de la fotografía, deben estar debidamente orientadas y tener la descripción ilustrativa. Además, cada fotografía debe incluir el código de la muestra en alguna de las esquinas inferiores.

Muestra en lecho seco

En algunos casos la metodología de muestreo cuando el cauce se encuentra seco es la misma que cuando por el cauce circula el agua; cuando el lecho se encuentra húmedo, lo que no permite ningún tipo de tamizado in situ, hay que embolsar el material directamente para ser tamizado posteriormente.

Material:

- Guantes hasta la altura de los codos
 - Tamices con abertura de 5 mm
 - Pala sin pintar
 - Sacos donde se colocarán los 2-3 kg de sedimento con granulometría inferior a 5 mm
 - Rotulador permanente azul o negro
 - Martillo para disgregar el sedimento
-
- La primera sub-muestra es coleccionada en el punto más bajo, cerca del ápice de la cuenca, mínimo 50 m de distancia aguas arriba del punto de confluencia de la corriente muestreada con la corriente de orden mayor (afluente receptor).
 - Tomar la altitud con altímetro y anotar los datos obtenidos en el formato de captura de datos de Campo y diligenciar la totalidad de los campos con la información del sitio de muestreo.
 - Verificar las coordenadas y registrar cada sitio de muestreo en los mapas topográficos respectivos. Se recomienda marcar el número de identificación completo de la muestra sobre el mapa, cerca al punto de localización del muestreo.
 - Coleccionar de 2.5 a 3 kg de muestra de sedimento <5mm activo (SA), mediante mezcla de cantidades iguales de sub-muestras (5 a 10 submuestras), tomadas aguas arriba y cubriendo una distancia

entre 50 a 200 m, a lo largo de la corriente. La cantidad de muestra colectada debe contener el suficiente material fino, de tal forma, que una vez sea realizado el tamizado en seco en el laboratorio (usando Malla 60 Ty o 0,18 mm), se garantice que se obtendrán mínimo entre 200 y 500 g.

- En el caso de esta toma de muestras en seco se debe excavar aproximadamente 20 cm antes de tomar la muestra para evitar el suelo y la vegetación que se ha formado en el cauce.

Registro fotográfico

Al momento de la toma de la muestra, se debe realizar el registro fotográfico de las características generales del sitio de muestreo, de acuerdo a las siguientes indicaciones:

- Panorámica general del drenaje muestreado, mostrando el lecho del drenaje, tanto aguas arriba como aguas abajo.
- Fotografía de la muestra recolectada.
- Fotografía del rotulado y empaquetado de la muestra ya colectada, donde se vea claramente la identificación de la misma, ya con su rótulo.
- Fotografía de los diferentes fragmentos líticos –rodados- que se encuentren en el sitio de muestreo.
- Si existen rasgos de interés, pueden tomarse más fotografías que incluyan, por ejemplo, los afloramientos presentes.

Todas las fotografías deben incluir escala gráfica, registro de la fecha y hora de la toma de la fotografía, deben estar debidamente orientadas y tener la descripción ilustrativa. Además, cada fotografía debe incluir el código de la muestra en alguna de las esquinas inferiores.

- Registrar en el GPS los *waypoints* o sitio de colecta de muestra, identificándolo con el código del sitio de muestreo.
- Identificar la muestra colectada con el código correspondiente al sitio de muestreo programado, usando etiquetas autoadhesivas, marcadas con un marcador de tinta indeleble, de color negro o impreso en computador.
- Colocar la etiqueta, sobre la bolsa plástica de polietileno transparente externa y cubrir la etiqueta con cinta transparente gruesa, para evitar que se borre el código.
- Proceder a anudar y sellar la bolsa usando cinta transparente o zuncho, de tal manera que se evite la pérdida de muestra y la contaminación de la misma.
- En los sitios seleccionados para tomar muestras de control de calidad (duplicados), se debe coleccionar simultáneamente la muestra original y la muestra duplicado, en cada sitio de sub-muestra, hasta coleccionar 2.5 a 3 kg por muestra, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente.
- Rellenar la ficha de campo correspondiente a los sedimentos de corriente.

Evitar posibles focos de contaminación como:

- Líneas eléctricas.
- Latas u otros objetos que sean foco de contaminación aguas arriba de la muestra.
- Vías de comunicación, siempre que sea posible es preferible tomar las muestras aguas arriba de las vías.

2.2.2.3. Sedimentos aluvionares de concentrados de batea

Material:

- Guantes hasta la altura de los codos
 - Tamices con abertura de 5 mm
 - Batea
 - Piqueta
 - Pala sin pintar
 - Balde
 - Rotulador permanente azul o negro
-
- Limpiar el equipo de toma de muestra (tamiz, batea, recipiente colector de sedimento, pala, etc.) con el agua del punto donde se va a tomar la muestra.
 - Georreferenciar el punto de muestreo, tomando las coordenadas con GPS del punto exacto de la toma de la muestra. Realizar el registro respectivo en el formato de toma de muestra de Concentrado de Batea. Cabe aclarar que los equipos GPS deberán estar debidamente calibrados y configurados en la base topográfica correspondiente.
 - Tomar el pH y la temperatura (°C) del cuerpo acuoso de la cuenca muestreada, en el sitio seleccionado para colectar la muestra. Ubicarse en un punto a lo largo de la corriente donde el agua sea lo suficientemente profunda para sumergir totalmente la batea (aproximadamente 20 cm), donde el agua corra de forma continua pero suave y sea posible agacharse o sentarse de una forma cómoda y segura.
 - Colectar la muestra de sedimento con ayuda de la pala plástica. Si se dispone de un tamiz, realizar el tamizado del sedimento sobre la batea para recolectar la fracción pasante. Lo anterior permitirá el desecho de la fracción gruesa retenida.
 - Frotar el tamiz con agua hasta que tres cuartos (3/4) de la capacidad de la batea se encuentren llenos con el material pasante. Sumergir cuidadosamente la batea con su contenido bajo el agua.
 - Si no se dispone del tamiz, se puede realizar la operación, realizando el retiro manual del material grueso.
 - Disgregar el sedimento para eliminar el limo, la arcilla y la materia orgánica, revolviendo y agitando el material con la mano, permitiendo que el agua circule suavemente para evacuar el material suspendido. Evacuar con la mano la mayor cantidad de material gravoso posible. Repetir el procedimiento hasta que el agua en la batea esté clara
 - Una vez el material este limpio de gravas y de material grueso, también de los materiales más finos y livianos como limos y arcillas, se debe tomar la batea con ambas manos para dar inicio al movimiento de bateado.
 - Agitar la batea suavemente para promover así el asentamiento de los materiales más densos en el centro y fondo de la batea y la salida por arrastre de las fracciones más ligeras hacia las orillas
 - Una vez se ha logrado la diferenciación de las fracciones minerales pesadas y ligeras, continuar con los lavados y el bateado para retirar la mayor cantidad posible de material liviano no deseado.
 - **Nota:** El tiempo que dure la operación y la eficiencia de la misma es dependiente de la experticia de la persona que realice la concentración.
 - Una vez obtenido el concentrado, se debe transferir cuidadosamente todo el material de la batea a una bolsa para muestra, previamente rotulada. Para garantizar la completa transferencia del

concentrado a la bolsa, se puede ayudar de pequeñas porciones de agua, que arrastren el material de interés hasta la bolsa.

- Si es necesario, repetir los anteriores numerales tomando varias submuestras y coleccionar aproximadamente entre 100 y 150 g de material concentrado.
- Decantar y retirar cuidadosamente el exceso de agua, recogida en la bolsa junto con el concentrado; asegurando que no se pierda el material. Cerrar la bolsa y anudarla.
- Tomar mínimo tres fotografías, la primera para mostrar la topografía general aguas arriba, la segunda para mostrar la naturaleza del lecho de la corriente (topografía y alrededores, afloramientos de interés en la zona de muestreo, etc.) y la tercera sobre la muestra colectada una vez ha sido empacada. Esta última debe reflejar el rótulo o código de la muestra.
- Limpiar completa y cuidadosamente los equipos de muestreo, una vez se termine la recolección de cada muestra.
- Diligenciar los registros respectivos del formato de toma de muestra de concentrado de batea. Dejar el sitio de muestreo en condiciones idénticas a las encontradas al inicio del trabajo.

2.2.2.4. Aguas superficiales de ríos y arroyos

Material:

- Guantes desechables
 - Dicromato de potasio (Pro analysis, PA, quality)/ 100 ml ácido nítrico (Suprapure quality).
 - Medidor de pH.
 - Medidor de conductividad.
 - Medidor de Eh.
 - Soluciones patrón para el dispositivo de pH y conductividad.
 - Agua destilada y desionizada en una botella de lavado con tubo al final
 - Concentrado de HNO₃ 65% de densidad 1,4 kg/l
 - Rotulador permanente
 - Neveras
 - Mapas
 - Bolsas de basura
 - 2 decantadores de plástico para las mediciones de pH y EC.
-
- Marcar en el mapa topográfico el punto exacto de la colecta de la muestra. Se recomienda marcar el número de identificación de la muestra sobre el mapa, cerca al punto de localización del muestreo. Diligenciar el Formato de Captura de Información en Campo para Muestreo de Aguas Superficiales y referenciar un sitio fácilmente reconocible en campo (ejemplo: a 200 m al NE de la escuela NN).
 - Tomar las coordenadas geográficas con GPS y la altitud con un altímetro Thommen o de precisión. Registrar la información obtenida en el Formato de Captura de Información en Campo para Muestreo de Aguas Superficiales.
 - Tomar la información de campo referente a: cuenca, sitio de muestreo, y de las características de las muestras y registrarla en el Formato de captura de Información en Campo para Muestreo de Aguas Superficiales.

- Rotular los frascos para cada muestra, la de aniones y la de cationes o según cada tipo de muestra, usando un marcador de tinta indeleble y colocar protector de cinta transparente (5 cm) para evitar pérdida de la numeración. Opcionalmente, en caso de no disponer de etiquetas, colocar el identificador sobre la botella plástica y protegerlo con cinta transparente para evitar pérdida de la numeración (Fig. 2.2.2.4).

Recomendaciones:

1. Utilizar siempre guantes para la recogida de muestras.
2. No usar anillos durante la toma de muestras
3. Tomar primero la muestra de aguas y después los sedimentos de corriente.
4. El agua es tomada en el primer lugar de recogida de sedimentos de corriente.



Fig. 2.2.2.4 - Registro fotográfico de muestras de agua superficial donde se muestra el código de la muestra, la localización y la fecha de registro.

Determinaciones de pH, conductividad y alcalinidad

En el punto seleccionado para coleccionar la muestra de agua superficial, proceder con las siguientes etapas:

- Calibrar los equipos de pH, conductividad y alcalinidad de acuerdo con las recomendaciones dadas en los manuales de funcionamiento de los equipos. Es necesario llevar a campo los estándares para calibración.
- Nota: La calibración se debe hacer antes de cada determinación o diariamente antes de hacer la primera medida.
- Lavar dos veces los vasos donde se van hacer las determinaciones de pH y conductividad con agua destilada y desmineralizada.
- Tomar una muestra de agua superficial y disponer los electrodos calibrados en el respectivo vaso para medir el pH y conductividad. También se debe medir la temperatura.
- Registrar los valores de pH (con una cifra decimal), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ o mS/m) y la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), en los campos correspondientes en el Formato de captura de Información en Campo para Muestreo de Aguas Superficiales.
- Lavar los electrodos y los vasos de precipitados con agua destilada y desionizada, retirar el agua de exceso con ayuda de toallas de papel y colocarlos en sus respectivos empaques.

Colectar muestra de agua sin filtrar (500 ml).

- Lavar dos veces la botella de 500 ml, previamente marcada, con agua de la corriente y luego sumergirla 20 a 40 cm por debajo de la superficie del agua y llenarla hasta que hayan salido todas las burbujas de aire de su interior.
- Llenar la botella completamente y cerrarla herméticamente mientras aún está sumergida bajo el agua. La posición del operador debe ser en contra de la corriente. En corrientes de mayor caudal se puede colectar la muestra con muestreador en el centro de la corriente aproximadamente a 0.6 veces la profundidad, por encima del fondo de la corriente.

Colectar muestra de agua filtrada y acidificada (500 ml)

Con equipo de filtración:

- Lavar dos veces la botella de 500 ml, previamente marcada, con agua de la corriente y luego sumergirla en el agua y llenarla completamente.
- Lavar el equipo de filtración con agua destilada y desmineralizada y colocar la membrana o filtro de celulosa de 45cm de diámetro y poro de 0.45µm.
- Filtrar los 500 ml colectados, utilizando equipo de vacío (bomba de vacío, jeringa, etc.). Cada vez que se use una nueva membrana o filtro, descartar los primeros 10 ml de agua filtrada.
- Tomar la botella (marcada) de 500 ml para muestras filtradas y acidificadas y lavarla dos veces con pequeñas porciones de muestra de agua filtrada.
- Llenar la botella totalmente con agua filtrada (cambiando de filtro cada vez que sea necesario). Adicionar 1 ml de HNO₃ al 60% (v/v) con un gotero o frasco dispensador (no permitir que la punta del gotero toque la muestra). Tener en cuenta que la muestra de agua filtrada deberá caer directamente en la botella sin que tenga contacto con las manos y que la punta del gotero no debe tener contacto con el agua de la botella.
- Tapar la botella herméticamente (tapa de seguridad) y agitar para homogenizar la solución. Proteger con cinta transparente la identificación de la muestra.

Colectar muestra de agua filtrada y acidificada para análisis de mercurio (100ml). Con equipo de filtración:

- Lavar dos veces la botella de 100 ml, previamente marcada, con agua de la corriente y luego sumergirla en el agua y llenarla completamente.
- Lavar el equipo de filtración con agua destilada y desmineralizada y colocar la membrana o filtro de celulosa de 45 cm de diámetro y poro de 0.45µm.
- Filtrar los 100 ml colectados, utilizando equipo de vacío (bomba de vacío, jeringa, etc.). Cada vez que se use una nueva membrana o filtro, descartar los primeros 10 ml de agua filtrada.
- Tomar la botella (marcada) de 100 ml para muestras filtradas y acidificadas para análisis de mercurio y lavarla dos veces con pequeñas porciones de muestra de agua filtrada.
- Llenar la botella totalmente con agua filtrada (cambiando de filtro cada vez que sea necesario). Adicionar 1 ml de solución de dicromato de potasio (0.2 g de K₂Cr₂O₇ / 100 ml de HNO₃) con un gotero o frasco dispensador (no permitir que la punta del gotero toque la muestra). Tener en cuenta que la muestra de agua filtrada deberá caer directamente en la botella sin que tenga contacto con las manos y que la punta del gotero no debe tener contacto con el agua de la botella.

- Tapar la botella herméticamente (tapa de seguridad) y agitar para homogenizar la solución. Proteger con cinta transparente la identificación de la muestra.
- Tomar mínimo dos fotografías; la primera para mostrar la topografía general aguas arriba a partir del punto de muestreo de agua superficial y la segunda para mostrar la naturaleza del lecho de la corriente en el sitio de muestreo (topografía y alrededores, afloramientos de interés en la zona de muestreo, etc.). Registrar la numeración correspondiente en el formato de Captura de Información en Campo para Muestreo de Aguas Superficiales.
- Empacar las botellas llenas, selladas y marcadas, en una unidad de enfriamiento, ej: caja térmica o refrigerador; procurando mantener una temperatura de 4 °C, para transportarlas lo más pronto posible al laboratorio para su preparación y análisis. En caso tal de que no haya sido posible filtrar o acidular las muestras en campo, esto se debe realizar a la menor brevedad posible, así como la remisión de las muestras al laboratorio. Verificar la identificación de la muestra y si es necesario, colocar nuevamente el identificador respectivo, protegiéndolo con cinta transparente (2.5 pulgadas) para evitar pérdida de la numeración.
- Limpiar completa y cuidadosamente los equipos de muestreo, una vez se termine la recolección de cada muestra.
- Para el duplicado, se necesitarán dos botellas de cada tipo y se repetirá todo el procedimiento sin olvidar ningún paso.
- Por cada 20 muestras de agua, todo el procedimiento debe realizarse con un blanco de agua destilada.
- El agua se recolecta en el sitio de la primera recolección de sedimentos.
- No olvidar que las aguas deben ser captadas en un sistema dinámico, es decir, si son estancadas ó son arroyos con agua temporal, considere la línea de agua seca.

2.2.2.5. Rocas

Material:

- Maza
- Cíncel
- Martillo
- Sacos resistentes para las muestras
- Marcadores permanentes

Sea cual sea el objetivo del muestreo y el tipo de roca (fresca o alterada) la toma de muestras de roca precisa de conocimientos mínimos de la geología de la región. Si la variabilidad litológica es grande el muestreo debe tener un espaciado más corto tanto en perfiles como en una malla. El intervalo de muestreo, por lo tanto, solo puede ser determinado cuando el muestreo vaya realizándose y siempre de acuerdo al objetivo del proyecto

La cantidad de muestra necesaria, de acuerdo al objetivo de la campaña, depende de la homogeneidad de la muestra y de su textura. Cuanto más grandes sean los minerales, mayor será la muestra representativa, estando las pegmatitas en el caso extremo donde es imposible tomar una muestra representativa.

Ejemplo de tabla de proporción entre el tamaño de grano y el tamaño de la muestra representativa (Levinson, 1980)

Tamaño de grano	Textura	Peso da la muestra representativa
3 cm	Pegmatítica	5 kg
1-3 cm	Grano grueso	2 kg
1-10 mm	Grano medio	1 kg
0-1 mm	Grano fino	0,5 kg

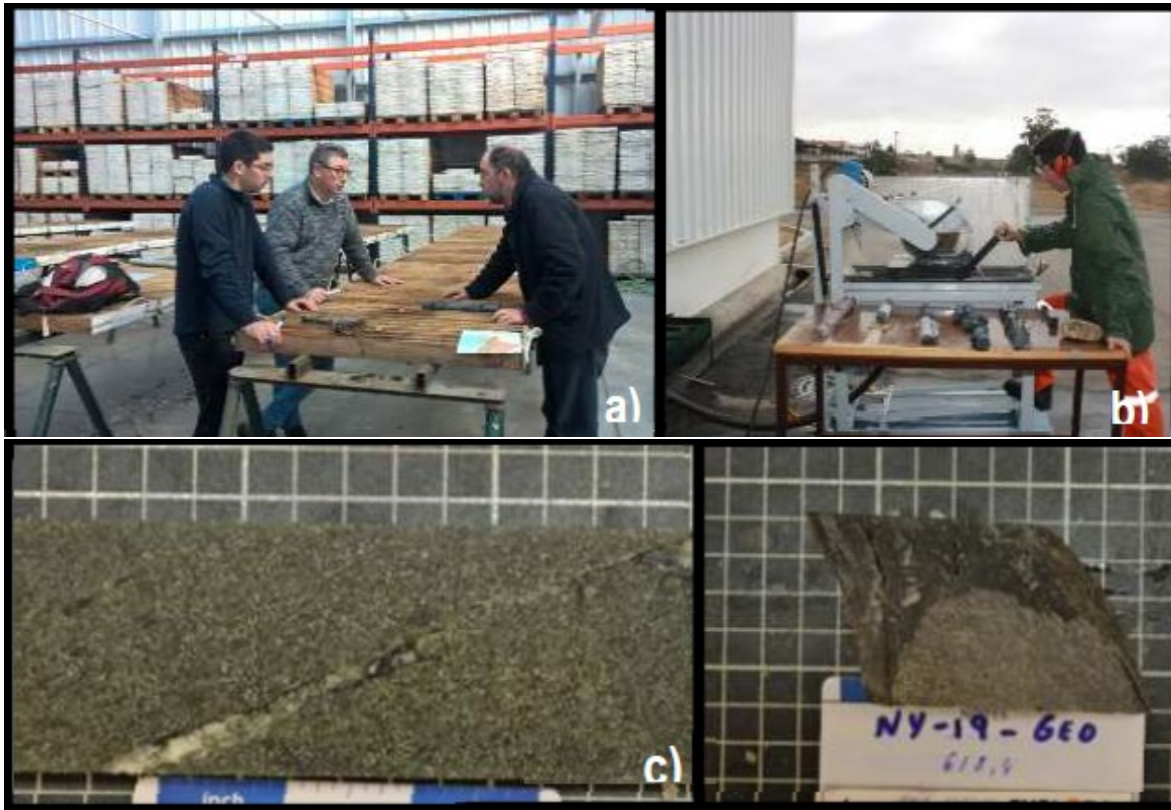


Fig.

2.2.2.5 - Muestreo de rocas en sondeos



Fig. 2.2.2.6 - Muestreo de rocas en galería de mina

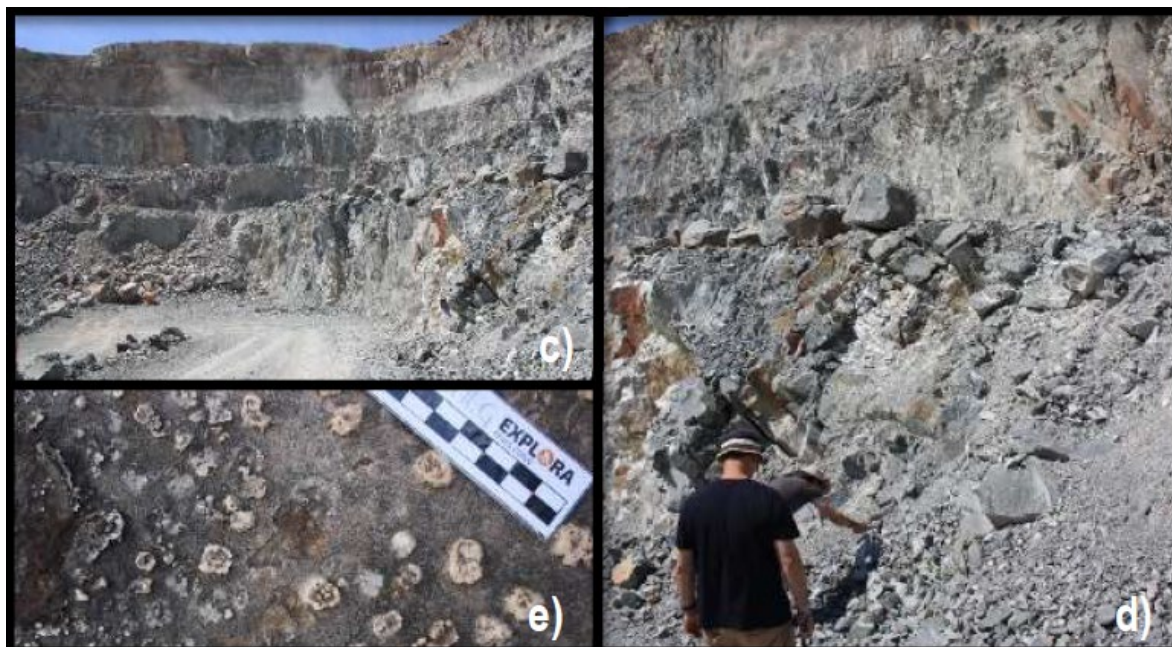


Fig. 2.2.2.7 - Muestreo de rocas en afloramiento

2.2.2.6. Suelos residuales

Los suelos han sido, desde prácticamente los inicios de la aplicación de la geoquímica a la exploración, uno de los medios más utilizados en los programas de exploración minera; los suelos presentan en áreas reducidas una gran variabilidad, teniendo mayor resolución que por ejemplo los sedimentos, por lo que son una herramienta adecuada para las prospecciones de detalle. Los suelos vuelven a utilizarse hoy en las cartografías geoquímicas por sus aplicaciones en el conocimiento del medio ambiente, y de la agricultura. Por esta vieja trayectoria, las técnicas de toma y utilización de los suelos son generalmente conocidas, aunque hoy en día, y por la ampliación de escenarios en los que es usada en estudios ambientales, se enfrenta a nuevos tipos de entornos, que plantean a veces problemas de método para su toma sistemática.

En general el uso de los suelos en geoquímica se recomienda en las siguientes situaciones (**ALS Technical Note**):

- Áreas con suelos residuales desarrollados sobre cualquier tipo de sustrato rocoso.
- Áreas con suelos desarrollados sobre un regolito in situ
- Áreas con suelos desarrollados sobre un regolito transportado con espesor inferior a 5 m.
- Áreas donde los antecedentes de uso de suelos en geoquímica han probado una historia de éxitos, alguno de los cuales puede estar en áreas de regolito transportado, pero en el cual los indicadores geoquímicos han alcanzado la superficie.

En la mayor parte de los contextos con suelos residuales y cuando se utilizan como medios de muestreo sedimentos de corriente y suelos, el punto de toma de éstos suele ubicarse, en las campañas regionales, aguas arriba del punto de toma del sedimento de corriente y en la misma cuenca de drenaje. Ello supone una mejora económica y de tiempo en la fase de toma de muestras. Desde la oficina y con la única ayuda

de fotografías aéreas, imágenes satelitales o mapa topográficos se puede saber si en un punto existen suelos residuales que satisfagan los requerimientos del trabajo. Por ello en los mapas de puntos de muestreo entregados al prospector, no figuran los puntos relativos a los suelos. Es el propio prospector, quien tras tomar el sedimento de corriente busca aguas arriba y en una ladera de la misma cuenca de drenaje un punto idóneo. Es importante tener la seguridad del carácter residual del suelo. Por ello se recomienda tener cuidado con no tomar la muestra en suelos desarrollados sobre aluviones de la llanura aluvial actual del arroyo, y cogerla en zonas de rellano, horizontales, a una cota superior a la del río y sus terrazas aluviales, o junto a cortes del terreno que permitan observar la sección del suelo y el tránsito hasta la roca del substrato. Una vez que el prospector localiza, teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, un lugar adecuado, debe observar con detalle los alrededores del punto y tener un gran cuidado de que el entorno del punto cumpla las condiciones expresadas en el apartado de sedimentos de corriente, en lo relativo a las posibles fuentes de contaminación que deben ser evitadas y en caso de que existan deberá buscar otra localización más limpia.

- Definir el sitio de muestreo, recorrer la zona aledaña al punto de muestreo de sedimentos activos de corriente y de agua superficial y seleccionar un área en donde se puedan excavar de 3 a 5 apiques, distanciados por lo menos 5 metros entre ellos para la muestra de suelo. Lavar el equipo de muestreo, previo y posterior a la toma de la muestra, con agua de la corriente de la cuenca muestreada.
- Marcar en el mapa topográfico el punto exacto de la muestra. Se recomienda marcar el número de identificación de la muestra sobre el mapa, cerca al punto de localización del muestreo. En el espacio de observaciones del Formato de Captura de Información en Campo para Muestreo de Suelos, referenciar un sitio fácilmente reconocible en campo (ejemplo: a 200 m al NE de la escuela NN).
- Al llegar al sitio seleccionado para coleccionar la primera sub-muestra, se deben tomar las coordenadas geográficas con GPS y la altitud con altímetro de precisión; tomar la información de campo referente a cuenca y sitio de muestreo; se debe registrar en el Formato de captura de información en campo para muestreo de suelos.
- Colocar la etiqueta con el identificador de la muestra en la bolsa plástica de 3 kg, usando un marcador de tinta indeleble y colocar protector de cinta transparente (5 cm) para evitar pérdida de la numeración. Opcionalmente, en caso de no disponer de etiquetas, colocar el identificador sobre la bolsa plástica y protegerlo con cinta transparente.

Material:

- Sacos de plástico para el humus
- Sacos kraft para muestras de suelos
- Guantes desechables (uno por muestra)
- Muestreador de plástico para el humus
- Tamices de malla de nylon ó de acero
- Espátula y cuchara de plástico
- Cuchillo

- Mapas (1/50.000)
- Rotulador permanente
- Cinta métrica de 2 m
- Cinta transparente de 5 cm
- Cajas de plástico para las muestras
- Pincel
- Azada

Humus:

1. Buscar una zona de forestación sin alterar donde el material se encuentra encima del suelo mineral.
2. El material es generalmente oscuro y poco compacto
3. La zona de la toma de muestra debe tener la menor pendiente posible para evitar el material de escorrentía.
4. Colocar la muestra en un saco de plástico usando guantes desechables.
5. Cada muestra debe ser compuesta en un área de 50x50 m.
6. Las muestras deben ser recogidas a distancias superiores a 5 metros del árbol más próximo y a 3 metros del arbusto más próximo.
7. Deber ser retirado de la muestra todas las rocas frescas y fragmentos de rocas usando los guantes desechables.

Suelo residual

Recogida de muestra de suelo superficial

1. Al llegar al lugar de recolección de muestras seleccionado, determine y guarde la ubicación y la altitud exactas mediante el proceso de registro de muestras en la aplicación.
2. Rellenar los diferentes campos de la ficha técnica de la aplicación, este proceso se puede realizar durante todo el proceso de muestreo.
3. Lave todo el material de muestreo antes y después de la recolección de muestras (utilice material plástico, sin pintar y sin metales) para evitar cualquier contaminación.
4. El muestreo deberá hacerse también de forma compuesta, es decir, según una malla cruzada, obteniendo cinco porciones, distanciadas de la muestra central veinte metros a cada lado.
5. La muestra puede tomarse en el horizonte "B", horizonte generalmente utilizado para la prospección de minerales, o retirar la capa vegetal (capa orgánica viva), las raíces grandes y los fragmentos de roca y profundizar hasta 25 cm dentro el horizonte A. La profundidad de este nivel es función del tipo de suelo, variando según el relieve, el clima y la naturaleza de la roca base del área a investigar. Por lo tanto, se debe realizar un estudio de orientación para esta evaluación y decisión.
6. Se mezclará, homogeneizará y penetrará a 5 mm de profundidad para eliminar el material grueso, materia orgánica, etc. Una opción es insertar y ajustar la malla plástica encima de la bolsa de polietileno transparente con adhesivo, procurando que el material que entre no se enganche ni atraviese la malla de nylon con una abertura de 5 mm. Inserte el conjunto de la bolsa en un balde con una capacidad de entre 5 y 6 litros, de modo que se ajuste a la parte superior del balde, para proceder de manera cómoda y segura al tamizar la muestra. El material para recoger será de 1 kg, con el objetivo de obtener un mínimo de 0,5 kg de fracción <2 mm.

7. Opcionalmente, se puede muestrear con barreno tipo Auger (Fig. 2.2.2.8).
8. Coloque la etiqueta en la bolsa de plástico de polietileno transparente en el exterior y cubra la etiqueta con cinta transparente para evitar que se borre el código.
9. Cerrar las bolsas con hilo de polipropileno y luego sellar la bolsa con cinta transparente, de manera de evitar la pérdida de muestra y la contaminación.
10. Marque el sitio de muestreo con pintura en aerosol en un lugar fácilmente visible (afloramiento, tronco de árbol, etc.).



Fig. 2.2.2.8 - Toma de muestra de suelo con barreno tipo Auger.

Colectar muestra de suelo profundo

En el apique excavado, coleccionar 2 kg de suelo profundo (horizonte C) en una sección de 25 cm inmediatamente sobre la roca o material parental y anotar la profundidad a la cual se tomó. Cuando el suelo es muy profundo o cuando no se puede identificar el horizonte C, tomar la muestra profunda a la máxima profundidad accesible entre 60 cm mínimo y 200 cm máximo y anotar la profundidad de la toma de la muestra.

Como método alternativo para coleccionar la muestra de suelo profundo, a partir de los 25 cm de apique excavado, se continúa la extracción de las muestras de suelo con ayuda de un barreno tipo Auger (Fig. 2.2.2.8). El barreno se introduce sucesivamente varias veces y se recupera cada porción de material de suelo extraído (barrenada). Cada porción de suelo extraído se coloca secuencialmente, sobre un plástico extendido, anotando la profundidad a la cual corresponde y se continúa extrayendo las capas siguientes y colocándolas una a continuación de la otra, sobre el plástico, hasta alcanzar la profundidad pretendida o antes si se encuentra el nivel freático o el horizonte C. Del suelo extraído del perfil más profundo (hasta 2 m) se coleccionan 2 kg de muestra representativa y se registra la profundidad a la cual se tomó la muestra. En caso de excavar un apique hasta los 2 m, la muestra más profunda (subsuelo) se toma primero y luego se toma la muestra más superficial (A o topsoil). Este procedimiento evita tener que limpiar el suelo superficial que cae y se deposita sobre la superficie del subsuelo. En caso de extraer la muestra con barreno (método alternativo), se debe evitar la mezcla de las capas del perfil de suelo, por lo que se aconseja

limpiar el barreno con ayuda de una espátula plástica y una toalla desechable cada vez que se retire el material extraído y antes de volver a introducir el barreno para una nueva extracción de suelo.

Pasos a seguir:

- Estudiar los horizontes del suelo, realizar un análisis descriptivo de las muestras colectadas y consignar la información que se indica en el formato de captura de información en campo para muestreo de suelos.
- Tomar por lo menos dos fotografías de cada sitio de muestreo de suelos: la primera para mostrar el paisaje en las cercanías del sitio de muestreo y la segunda para mostrar las características de la capa orgánica y de los horizontes del suelo en uno de los apiques de muestreo.
- Antes de tomar la segunda fotografía se recomienda marcar los horizontes del suelo y colocar una escala o cinta métrica de madera, para mostrar las capas y las características texturales de cada horizonte. En caso de haber extraído las muestras con barreno tipo *Auger* se deberá tomar una fotografía con los detalles del perfil reconstruido sobre el material plástico. Registrar la numeración correspondiente en el formato de Captura de Información en Campo para Muestreo de Suelos. Empacar cada muestra (superficial y profunda), en las respectivas bolsas de muestreo (plásticas), anudarlas y sellarlas con cinta transparente (2,5 pulgadas).
- Colocar cada bolsa de muestreo sellada dentro de otra bolsa de polietileno para evitar contaminación cruzada durante el transporte, cerrarla con un nudo y sellarla con cinta transparente de 2,5 pulgadas. Verificar la identificación de la muestra o marcar nuevamente con el identificador respectivo, protegiendo el identificador con cinta transparente (2,5 pulgadas) para evitar pérdida de la numeración. Embalar las muestras en una caja de plástico (identificadas), para transportarlas lo más pronto posible al laboratorio para su preparación y análisis.
- Volver a llenar el apique u orificio abierto, con el mismo material retirado al abrirlo y colocar la cobertura orgánica retirada durante la apertura del apique.

Limpiar completa y cuidadosamente los equipos de muestreo, una vez se termine la recolección de cada muestra.

Determinar pH del suelo

En el punto seleccionado para colectar la muestra de suelo, se debe proceder a tomar el pH. Calibrar el equipo medidor de pH de acuerdo con las recomendaciones dadas en el manual de funcionamiento del equipo. Es necesario llevar a campo los estándares para calibración. Lavar el vaso donde se van hacer la determinación de pH con agua destilada y desmineralizada. Preparar una pasta de suelo en agua, con una proporción 1:1 y mezclar durante 5 minutos aproximadamente. Lo anterior permitirá que se alcance el equilibrio entre las fases sólido-líquido. Introducir el electrodo del pH-metro en la pasta anterior, continuar con la agitación y esperar hasta que se estabilice la lectura de pH. Registrar la medida de pH

(con una cifra decimal) y de temperatura (T °C), en el Formato de Captura de Información en Campo para Muestreo de Suelos.

2.2.2.7. Otros medios de muestreo

Plantas

- Las plantas deben ser muestreadas preferentemente cerca del suelo a muestrear.
- Una planta puede ser muestreada entera o solo sus hojas, dependiendo del objetivo, y antes de ser colocada en el saco, si se va a muestrear entera, debe limpiarse la raíz para evitar los restos del suelo adherido. Dependiendo del objetivo se puede separar la raíz del tronco.
- Debe ser debidamente etiquetada

Muestreo para iones metálicos móviles (MMI) en suelos sobre zonas mineralizadas para la detección de posibles yacimientos en profundidad.

Material

- Sacos de plástico
 - Guantes desechables
 - Recogedor de plástico
 - Mapas (a escalas adecuadas)
 - Rotulador y bolígrafo
 - Cinta métrica de 2 metros
 - Cajas de plástico con tapas para muestras
 - Azada
-
- Deben ser tomados 120g de muestras de suelos residuales a profundidades de 10-20 cm.
 - Las muestras deben ser colocadas en sacos de plástico donde se remueva todo el aire, siendo colocadas a su vez dentro de otro saco donde se remueva también todo el aire.
 - Las muestras envasadas son identificadas con una referencia de la muestra y la localización con un rotulador indeleble.
 - Si el suelo está seco puede ser tamizado previamente con un tamiz de malla 2 a 5 mm.
 - Si el suelo está húmedo se colocará directamente en el saco habiendo retirado previamente los fragmentos de rocas más grandes.

2.2.3 Gestión de las muestras

Las muestras deberán ser nombradas según la codificación que se ha establecido en base a los requerimientos de cada proyecto a desarrollar. Embalar las muestras en cajas de plástico, de paredes lisas, identificadas con las etiquetas. Las muestras deberán ser guardadas en un lugar seguro, previo al envío al laboratorio y cuidando que las bolsas no se deterioren ni se rompan. El transporte al laboratorio debe asegurar que se mantenga la integridad de las muestras. Las muestras deben conservar las propiedades originales del lugar de muestreo durante el transporte y entrega al laboratorio, lo que debe ocurrir lo más rápido posible.

Capítulo 3 – Preparación física de muestras

La mayoría de las muestras de ocurrencia natural como los materiales geológicos (rocas, sedimentos y suelos) requieren algún tipo de preparación física antes del análisis químico. Los objetivos que se buscan en la preparación de las muestras son las siguientes (Taylor & Theodorakos, 2002; Peacock et al., 2002; Peacock, 2002):

- Reducir el tamaño de la muestra para la obtención de una sub-muestra cuyo tamaño sea más conveniente para su manipulación.
- Aumentar el área de la superficie de la muestra para mejorar la eficiencia del ataque químico subsiguiente.
- Homogeneizar para asegurar la obtención de una sub-muestra representativa de toda la muestra.
- Separar la muestra en componentes basados en mineralogía, tamaño de grano o criterios físicos y morfológicos.

De este modo el objetivo de la preparación de materiales geológicos es obtener a partir de una muestra cruda u original una sub-muestra representativa, homogénea y con las condiciones necesarias de tamaño de partícula, para la realización de análisis químicos mediante técnicas instrumentales y métodos clásicos de análisis. La preparación de la muestra es un paso importante en el proceso analítico. Sin una preparación cuidadosa y sin atención a la contaminación entre muestras, el valor de los análisis posteriores se ve comprometido significativamente.

Esta fase incluye todas las operaciones destinadas a poner las muestras en disposición de ser analizadas, de obtención para réplicas de referencia para archivo, y de preparación de réplicas a partir de muestras duplicadas en campo y de las muestras originales correspondientes, para el control de calidad analítico (ver el apartado de control de calidad). Esta fase a menudo no es valorada como esencial en los proyectos, porque a veces no se es consciente de la importancia que tiene su solvencia, y el control que debe seguir para evitar en lo posible los errores y procesos de contaminación que pueden tener lugar, por lo que condiciona en gran medida la calidad final de un proyecto de cartografía geoquímica.

Se hace la aclaración, que en el análisis geoquímico de aguas superficiales con el objetivo de conocer las cantidades totales de iones solubles, las muestras de agua son analizadas directamente, sin ningún tratamiento previo, aparte de la microfiltración que requieren algunos métodos analíticos en particular.

Un laboratorio de preparación de muestras debe seguir las normas recomendadas, satisfaciendo, en particular, las exigencias en cuanto al material utilizado en los equipos y elementos de molienda y clasificación y también a un ambiente y organización del trabajo que minimizará, en lo posible los errores que pudieran producirse. En esta fase suelen tener lugar errores que generan contaminación

cruzada entre muestras que generalmente son subestimados, pero que son de gran repercusión en la variabilidad (varianza) de los datos analíticos obtenidos (Reimann, 2008).

Al margen de los aspectos de control y organización en el orden a evitar errores de numeración en las muestras, la instalación de trabajo principal de un laboratorio de preparación de muestras geoquímicas, debe estar dotada de extractores de polvo y la sala de tamizado y de molienda deben contar con un sistema de atmósfera deprimida, lo cual evita un ambiente pulverulento generado por el material particulado que se produce en el manejo de materiales geológicos. Los materiales de los equipos de molienda (cofrés o recipientes de molienda y cuerpos moledores) y los utensilios utilizados en todas las operaciones (tamices, palas, cuarteadores, recipientes, etc) deben cumplir las exigencias de no aportar elementos contaminantes, o en su defecto realizar un aporte controlado y conocido del tipo de elementos y de su potencial concentración a la muestra preparada. Es indispensable restringir el uso de elementos y herramientas que contengan pintura o recubrimientos y que desprendan capas de óxidos.

En general, el objetivo del análisis geoquímico determina las condiciones de molienda y clasificación de un material geológico. De este modo, si se requiere analizar un elemento particular en niveles de concentración de trazas y ultratrazas, debe ser mayor el cuidado y control de la contaminación durante el proceso de la preparación de las muestras. Usualmente se requieren elementos y equipos de molienda fabricados en materiales especiales como el acero inoxidable y otras aleaciones metálicas, algunos cerámicos y aleaciones especiales como nitruro de silicio, carburo de tungsteno, zirconio, ágata, entre otros. Lo relevante es tener presente que siempre va a ocurrir el desgaste de los sistemas de molienda, por lo tanto siempre va a existir un aporte de elementos que pueden contaminar la muestra durante la preparación; es responsabilidad del laboratorio monitorear y controlar dichos aportes de contaminantes. El uso de materiales conocidos como "blancos de preparación" es una herramienta útil para evaluar el aporte de contaminación y contribuye eficazmente en el control de la calidad analítica y operacional durante un programa de análisis químico de materiales geológicos.

Otro aspecto importante es la disposición y organización de espacio para racionalizar la clasificación y almacenamiento temporal de muestras por tipos, haciendo énfasis en que no se recomienda mezclar muestras mineralizadas y no mineralizadas durante un mismo lote de preparación.

3.1 Preparación física

Equipos y materiales

- Martillo de madera o de otra superficie suave, o tapón de goma.
- Bandejas.
- Láminas de plástico.
- Estufa con circulación de aire capaz de mantener una temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ (no indispensable).
- Tamiz de acero inoxidable o de otro material inerte, con orificios de 2 mm o según lo requiera el método de preparación de la muestra.
- Mortero y pistilo de porcelana.
- Bolsas o frascos de plástico con tapa para almacenar las muestras.
- Mortero y pistilo de ágata.

- Tamiz de acero inoxidable o de otro material inerte, de orificios de 0,5 mm o según lo requiera el método de preparación de la muestra en el método de análisis.

3.2. Preparación de sedimentos y suelos

3.2.1. Preparación de sedimentos en el campo

La totalidad de la muestra seca y disgregada es sometida a un proceso de tamizado con el fin de obtener la fracción granulométrica de interés, la cual puede ser menor a 2 mm, 180 μm , 150 μm y 73 μm , entre otras (Peacock et al., 2002; Peacock, 2002; Prieto-Rincón & Espinosa-Gonzalez, 2011), este proceso puede ser realizado en campo en el momento de la toma de la muestra lo cual se denomina tamizado en húmedo (Figura 3), y presenta como ventaja sobre el tamizado en laboratorio que con este se evitan pérdidas de material como material particulado volante. Estudios en el Reino Unido han demostrado que la recuperación de sedimentos de corrientes por métodos de tamizado en seco presenta problemas debido a la aglomeración de material fino para formar partículas más grandes que luego se filtran en cantidades variables.

- Equipo y material: Guantes gruesos hasta el codo.
- Tamices tipo BGS o kit de plástico tipo Aveiro
- Red (malla) de 2mm
- Red (malla) 0,150 mm
- Red (malla) 5 mm
- Embudo
- Pala con mango sin pintar
- Recipiente de plástico (balde) en el que se tamiza la muestra en el sitio de recolección (húmeda).
- Bolsas de papel 93raft donde se colocarán de 500 g a 1 kg de fino <0,150 mm
- Bolsa de plástico donde se colocará la bolsa de papel
- Bolígrafo y rotulador de tinta permanente negro o a azul
- Martillo para las colectas, seco para disgregar
- Balde para recoger submuestras hasta el tamiz

Procedimiento para llevar a cabo para la preparación de las muestras en campo en lecho húmedo:

1. El primer procedimiento será lavar todo el equipo y material en la corriente de agua donde se recogerán los sedimentos.
2. Buscar un lugar en el centro del lecho del arroyo para evitar la materia orgánica que se encuentra en el aluvión.
3. El sedimento se debe recoger en un sistema dinámico, que se elige por observación visual de un lugar con arena fina que debe ser de color claro.
4. Colocar los tamices uno encima del otro (arriba la red 2 mm y abajo la red 0,150 mm u otra) y el balde debajo de los tamices.
5. Verter el sedimento en el primer tamiz y “forzar” su paso al tamiz inferior, que puede ser ayudado poniendo agua que se recoge con el embudo, procediendo de la misma forma para el paso del sedimento < 0,150 mm hacia el balde. El total del sedimento debe ser mayor 500

g y debe dejarse reposar en el balde durante unos 30 min para permitir que el sedimento decante (este tiempo puede ser aprovechado para tomar la muestra de suelo). Para quitar el tamiz inferior, se debe tener cuidado y asegurarse de que ningún grano > 0,150 mm pase al balde.

Procedimiento a llevar a cabo para la preparación de las muestras en campo en lecho seco:

1. Recoger y tamizar en seco (cuando el cauce está seco):
 - a. Coloque el tamiz de nylon con una abertura <5 mm en medio del perfil entre las 5-10 submuestras.
 - b. Después de obtener el suficiente material de aproximadamente 5 kg, colocar en bolsas krafts hasta completar esta cantidad y luego colocar cada bolsa 94raft en una bolsa de plástico.
2. Siempre que se realice una recolección en seco (cuando el cauce del río esté seco) del sedimento por falta de agua en el cauce del río, es necesario recolectar 5 kg de ser posible una fracción menor a 5mm.
3. En caso de recolectar en seco cavar cerca de 20 cm antes de la recolección, para evitar el suelo y la vegetación que se haya acumulado en el centro del lecho del arroyo, a continuación, se realiza la recolección quitando los cantos rodados y realizando previamente un tamizado menor a 5mm

Procedimiento común:

1. El tamizado de 2mm sólo se realizará tras el secado al aire a < 40°C.
2. La recolección comienza en el punto donde se recolectó el agua y continúa río arriba a lo largo de 250 a 500 m en 5 a 10 lugares equidistantes.
3. El muestreo del compuesto no debe realizarse cuando el material está mezclado por sedimentos de diferente naturaleza.
4. Se debe codificar un suficiente número de bolsas Kraft para contener la cantidad necesaria de sedimento fino.
5. El número de bolsas utilizadas debe registrarse dependiendo de la naturaleza del material. A continuación, todas las bolsas 94raft se colocan en bolsas de plástico.
6. En el laboratorio se realiza el secado al aire o a temperatura inferior a 40 °C, y el tamizado a una granulometría de 2 mm, que no puede ser inferior ya que en ocasiones se produce agregación de partículas de arcilla que se forman a esta granulometría y que con una malla más pequeña serían eliminados, llevando en su composición importantes elementos traza que no se retienen en la matriz final.
7. Evitar fuentes de contaminación local como:
 - Cables eléctricos
 - Latas u objetos, fuentes de contaminación local aguas arriba del sitio de recolección
 - En carreteras de alto tráfico, recolectar la muestra a más de 15 m de distancia
 - En senderos recolectar la muestra a más de 5 m de distancia
 - Siempre que sea posible aguas arriba de la carretera o sendero
8. Tomar una buena fotografía del mejor sitio específico de muestreo (lecho del arroyo) para mostrar la naturaleza del sedimento que se recolectó y dónde, y una buena fotografía del lecho del arroyo a lo largo de la cual se recolecta la muestra desde el primer punto.
9. Rellenar la hoja de campo correspondiente a los sedimentos fluviales.



Figura 3.1.1. Proceso de tamizado en húmedo en campo ($< 180 \mu\text{m}$) en la toma de sedimentos de corriente (Colombia).



Figura 3.1.2. Proceso de tamizado en húmedo en campo ($< 150 \mu\text{m}$) en la toma de sedimentos de corriente (Portugal).



Figura 3.1.3. Proceso de tamizado en seco ($< 2 \text{ mm}$) en campo en la toma de sedimentos (España).

3.2.2. Preparación de sedimentos y suelos en laboratorio

Las muestras de sedimentos de corriente y las de suelos residuales presentan un flujo de preparación similar que queda resumido en la Figura 3.1.

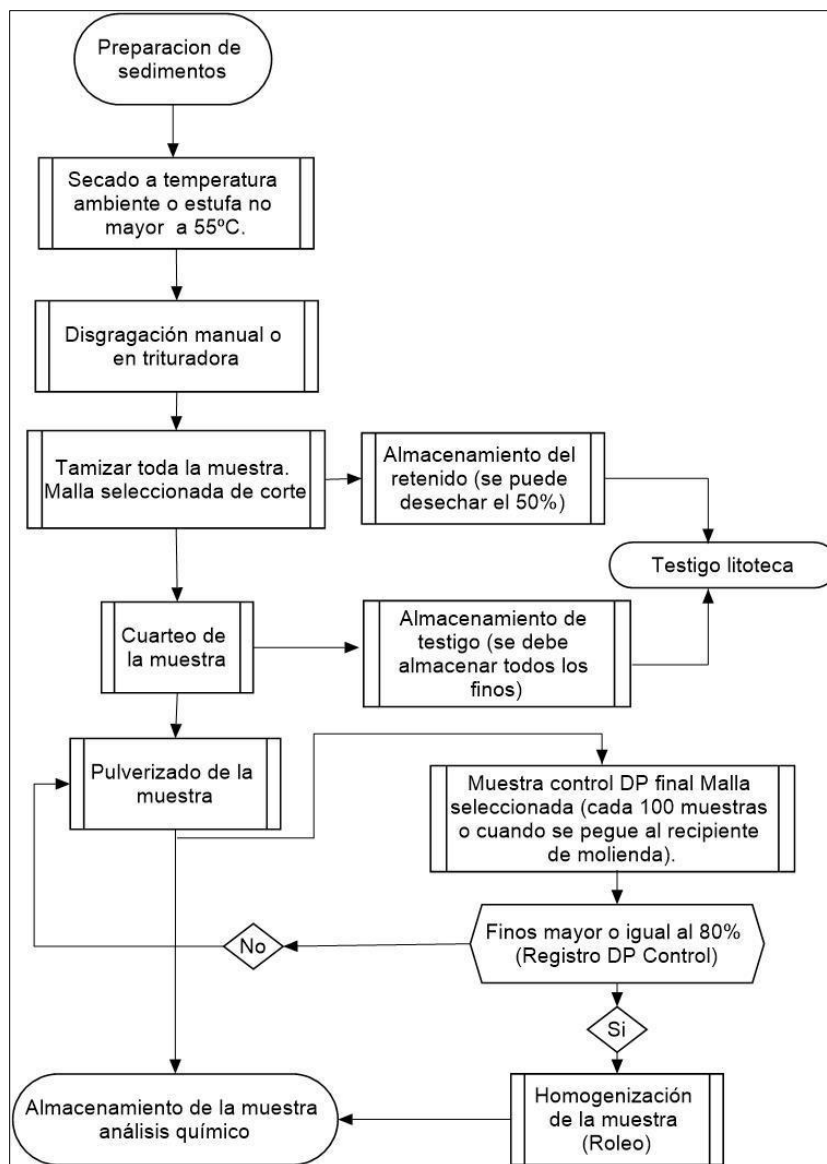


Figura 3.1.4. Esquema de preparación de muestras de suelos y sedimentos de corriente.

a) Secado

Los contenidos totales de las bolsas, junto con una cartulina con el identificador de la muestra escrito a lápiz, se colocan en bandejas de aluminio anodizado o plásticas donde pueden ser secadas a temperatura ambiente (Fig. 3.2) o bien ser introducidas en grandes estufas con control de temperatura y sin ventilación forzada (figura 3,3). El secado de las muestras en estufas se efectúa a una temperatura regulada de 40°C (4-6 días).



Fig. 3.1.5. Secado de muestras a temperatura ambiente. (Lab IGME-España)



Figura 3.1.6. Estufa para el secado de muestras. (Lab IGME-España)

b) Disgregación y homogeneización

Una vez secas, se procede a disgregar los grumos formados, en particular por materiales muy arcillosos o con abundantes hidróxidos de Fe, mediante un rodillo de amasar de madera o un rodillo de porcelana. Tras el proceso de disgregación las muestras son homogeneizadas por cuarteos sucesivos en cuarteadoras.

En el caso de suelos arcillosos, secar previamente la muestra hasta alcanzar un grado de humedad que permita una fácil desintegración de los terrones.

c) Tamizado

Tras el secado y homogeneización, las muestras pasan la operación de tamizado, por tamices con bastidor de acero inoxidable y con malla, asimismo, de acero inoxidable. Esta operación se debería realizar en una sala con extractores de polvo. Entre el paso de una muestra y de la siguiente, se procedía a la limpieza, con cepillos y aire comprimido, de tamices y otros utensilios, así como de la mesa de trabajo. Al término del trabajo diario se elaboran listados de las muestras preparadas para su chequeo con los listados recibidos por la mañana de muestras a preparar. En este paso existen diferencias dependiendo del tipo de muestra del que se trate, bien sean muestras de sedimentos de corriente o muestras de suelos.

Sedimentos de corriente

Las muestras de sedimentos de corriente, ya tamizadas in situ a 2 o a 5 mm, serán secadas a 40°C. Una vez secas, se disgregan, cuartean y tamizan a la granulometría de 150 micras. De la fracción inferior a 150 micras se preparan cuatro réplicas o submuestras, mediante el correspondiente cuarteo. De estas cuatro submuestras, tres se almacenarán en un frasco de plástico con tapa, de 2,5 cm de diámetro y 7,5 cm de altura aproximadamente. La cuarta submuestra se utilizará como muestra de archivo y se almacenará en un bote de 6,5 cm de diámetro y 10 cm de altura, con capacidad para unos 250-300 g de material. Todos los botes de submuestras irán identificados con el mismo código de identificación para cada réplica que, a su vez, tiene que coincidir con el código de la muestra proveniente del muestreo en campo. Esta operación se realiza en todas y cada una de las muestras de sedimentos.

Se preparan submuestras, para el análisis químico total y parcial, para la determinación del contenido en TOC y otra en bote de plástico de mayor tamaño (6,5 cm de diámetro y 10 cm de altura, con capacidad para unos 250-300 g de material) para su almacenamiento en las instalaciones específicas

En el caso de sedimentos de corriente el tamaño del tamiz depende en parte del tipo de sedimentos que tengamos en nuestra zona de trabajo. Donde el sedimento fino es bastante escaso es necesario hacer el corte en un tamaño de partícula un poco más grande, como la malla de 60 ASTM (250 μm), con el fin de obtener la cantidad de material fino necesario para los análisis. Donde el sedimento fino es más abundante se puede tamizar por malla 80 ASTM e incluso 100 ASTM (150 μm).

Suelos

Para los suelos donde el tamaño de partículas es más grande suelen tamizarse incluso a 2 mm para posteriormente moler y pulverizar en anillos de ágata hasta obtener una granulometría inferior a 200 mallas (60-70 μ).

Después, y mediante procesos de cuarteo en cuarteadoras, la fracción obtenida sirve para preparar distintas submuestras para los distintos tipos de análisis y almacenamiento que son introducidas bien en cajas para su envío a laboratorios o bien para su almacenaje.



Figura 3.1.7. Molino Tema de anillos de ágata Tema. Dcha: Cazoleta y anillos de ágata tras su limpieza. (Lab IGME-España)

3.3. Preparación de muestras de llanuras de inundación y sedimentos de overbank

Las muestras de sedimentos de llanuras de inundación y sedimentos de overbank, siguen el proceso inicial similar al descrito en las muestras de sedimentos de corriente y suelos, una vez secas, disgregadas y homogeneizadas, son pasadas por el tamiz con malla de acero inoxidable y con luz de 63 μm . Con la fracción de granulometría < 63 μm , se siguieron los mismos pasos para su envasado y clasificación que con las demás muestras.

3.4. Preparación de muestras de concentrados de minerales pesados

Los resultados del análisis de minerales pesados dependen en gran medida de las opciones metodológicas y de los objetivos, ya sean de procedencia y abundancia de minerales económicos, cuya primera elección se realiza en el campo donde las variaciones en los sitios de deposición de sedimentos en el muestreo conducen necesariamente a resultados diferentes entre cada estudio de minerales pesados.

Las muestras de sedimentos para la obtención de concentrados de minerales pesados que no pudieron ser bateadas en el punto de toma de la muestra, por ir el arroyo seco, han sido enviados íntegros cerca de 10 litros (la fracción inferior a 5 mm), al laboratorio de preparación, dónde un bateador único y experimentado las batea hasta obtención de un concentrado de minerales pesados. Esta muestra necesita una preparación específica para su estudio a la lupa binocular, preparación que se explica en el apartado de análisis químico.

1. Tamizar a 3 mm en un plato de 400 mm de diámetro, el recipiente debe tener agua para desintegrar la muestra, separando las fracciones más gruesas de las arcillas.
2. Lavar el material en un tamiz de menos de 3 mm en agua, para eliminar arcillas y limos, evitando así la formación de una pulpa excesivamente densa que pueda llevar minerales pesados, así como mejorando la observación en la sartén o en un recipiente adecuado.

3. La operación de concentración se realiza mediante movimientos de rotación en ambos sentidos y también verticalmente tantas veces como sea necesario hasta que quede una capa de aproximadamente un centímetro de concentrado en el fondo del recipiente.
4. El concentrado se tamiza a 1 mm en una cubeta de 300-250 mm de diámetro, realizando exactamente la misma operación que en las fases 2 y 3.
5. Finalmente, se vierte el concentrado en una bolsa plástica de tamaño mediano, cuidando que no se pierda ninguna porción del concentrado;
6. Identificar la muestra recogida con el código correspondiente, utilizando etiquetas autoadhesivas.
7. Coloque la etiqueta en la bolsa de plástico de polietileno transparente, en el exterior, y cubra la etiqueta con cinta transparente, para evitar que se borre.
8. Proceder a cerrar la bolsa con hilo de polipropileno y luego sellar la bolsa con cinta transparente, de tal forma que se evite la pérdida de muestra y cualquier contaminación de la misma.

El método clásico de gravimetría es la separación basada en las propiedades de los minerales detríticos, principalmente en el tamaño y densidad del grano, y su eficiencia depende del procedimiento seguido y de la habilidad técnica del operador. Los estudios de minerales pesados en el pasado se han centrado tradicionalmente en la fracción de arena, por lo general eligiendo en una ventana estrecha de tamaño de grano para el análisis, un enfoque que está destinado a introducir un serio error, descuidando una parte grande, y a veces muy grande, del espectro de minerales pesados presentes en la muestra. Para minimizar el error, no solo se debe considerar el rango más grande posible de tamaños en cada muestra, sino que también se deben aplicar los mismos métodos analíticos cuantitativos al rango más grande posible de tamaño de grano que ocurra en el sistema de sedimentos hasta 5 μm . o menos.

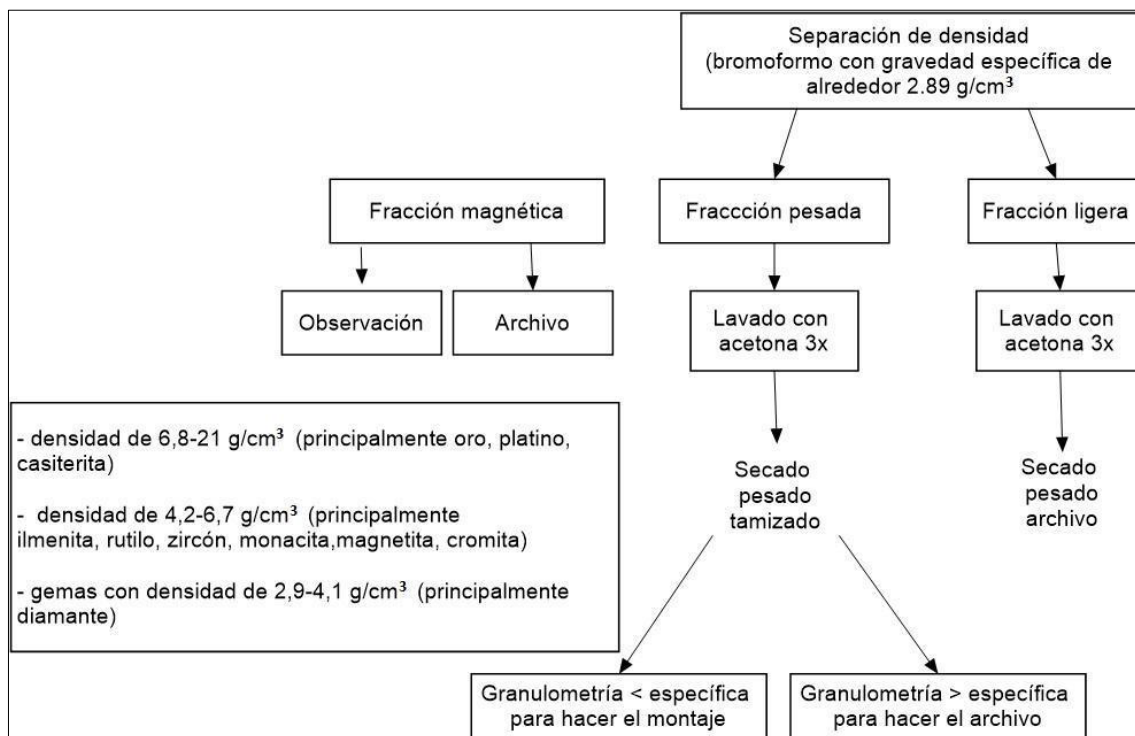


Figura 3.1.8.- Esquema para separar y preparar muestras de concentrados de batea

3.5. Preparación de muestras de roca

Las muestras de roca tienen como objetivo la caracterización geoquímica, realizándose paralelamente el estudio petrográfico de las muestras, siempre que sea posible. De esta forma, las rocas se cortan en la sierra y se dividen en fracciones similares, con una parte enviada para la ejecución de láminas delgadas, otra para el archivo y aún una parte que sigue a una molienda en un molino de mandíbulas. Luego pasan a la molienda fina donde son pulverizados en molinos de anillo y de bolas.

a) Secado inicial

Si se tiene una muestra mojada debe secarse hasta eliminar la humedad. Como precaución, todas las muestras deben pasar un tiempo en la estufa para eliminar cualquier humedad.

b) Trituración

Esta operación puede requerir una reducción previa del tamaño de la muestra. En ese caso, fragmente con una almágana el mineral hasta un tamaño adecuado para su alimentación a un Triturador de Mandíbulas. Paralelamente separar muestra testigo y almacenarla.



Figura 3.1.9 Muestra de roca antes de trituración

Todo equipo de trituración y molienda debe ser limpiado luego de su uso para evitar contaminaciones en la muestra, en uso continuo se pueden limpiar con arena o cuarzo y ambientar con los sobrantes de los cuarteos.



Figura 3.1.10. Trituradora de mandíbulas preparación de muestras laboratorio INHGEOMIN

c) Cuarteo

Los cuarteos se realizan según la cantidad de muestra y previos a la trituradora de discos y la pulverizadora de anillos. Se realizan en rifle.

d) Molienda

Trás el proceso de cuarteo es importante realizar un proceso de molienda. Se debe procurar obtener el mayor grado posible de homogeneización o mezclado de la muestra triturada ya que por el tamaño de las partículas se compromete la uniformidad de la composición.



Figura 3.1.11. Molino o pulverizador de discos



Figura 3.1.12 Muestra triturada, homogenizada y cuarteada lista para pulverizar



Figura 3.1.13. Pulverizadora de anillos concéntricos y anillos concéntricos de la pulverizadora



Figura 3.1.14. Muestra antes y después del pulverizado de anillos

e) Tamizado

La finalidad del tamizado es asegurar un tamaño de partícula específico, que varía según el mineral y/o el análisis a efectuar. Los tamaños de malla se especifican en los procedimientos de cada método de ensayo.



Figura 3.1.15. Tamices de 200 y 80 MESH y muestra tamizada a malla 200 MESH

f) Secado final

Previo al análisis de laboratorio el pulverizado debe secarse, lo más común según análisis es a 105°C por 2 horas o hasta peso constante, pero dependerá de la naturaleza del análisis. Usar temperaturas muy elevadas o periodos muy prolongados de secado puede provocar:

- Que el agua de cristalización y el agua de combinación se escapen
 - Se volatilizan los componentes.
 - Si la temperatura se eleva demasiado la muestra se oxida.
- Todo lo anterior produce deterioro de la calidad de la muestra debido a cambios en la composición.



Figura 3.1.16 Muestra pulverizada en secado final

En algunos métodos en donde la calidad de la pulverización es crítica para obtener resultados precisos, se requiere pulverizar la muestra hasta que el 95-100% de la sub-muestra pase por la malla de 73 μm (Taylor & Theodorakos, 2002), en la Figura 3.1.18 se presenta como ejemplo el diagrama de flujo del protocolo de preparación de muestras de roca para análisis por FRX e ICP-MS, desarrollado en el laboratorio de análisis geoquímico del Servicio Geológico Colombiano. Se recomienda ejecutar la pulverización en equipos con bajo contenido de Cromo (Cr) y Hierro (Fe), adicionalmente se debe realizar una continua revisión del QA/QC de muestras blanco con el fin de evaluar otros elementos contaminantes como Wolframio (W), Níquel (Ni) y Vanadio (V).



Figura 3.1.17 Muestra de roca pulverizada (< 73 μm) para análisis (SGC).

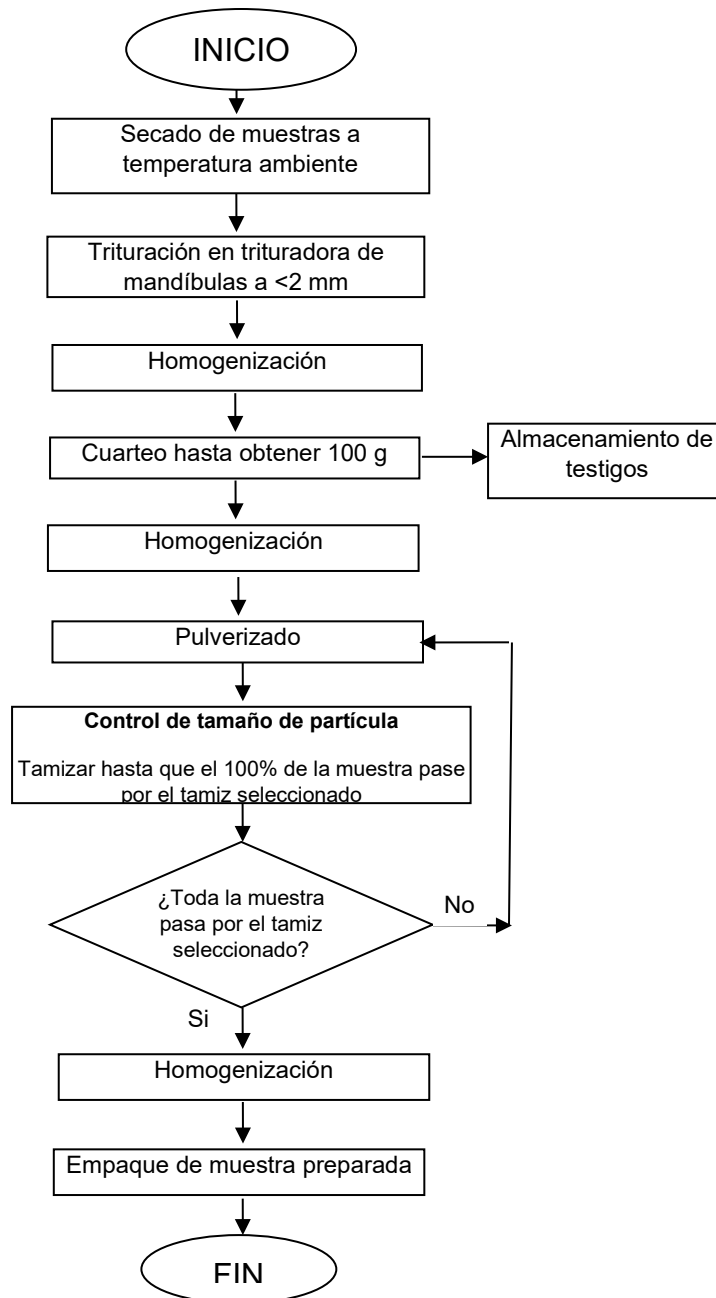


Figura 3.1.18. Diagrama de flujo protocolo de preparación de muestras de roca desarrollado en el laboratorio de análisis geoquímico del Servicio Geológico Colombiano.

3.6. Blancos de preparación física

Las muestras de roca, al ser procesadas antes del análisis, pueden tener un control de la eventual contaminación durante el proceso de preparación física. Por lo tanto, en las diversas etapas de la pulverización, se insertan muestras “blanco” que generalmente corresponden a un material rico en cuarzo con el que se evalúa el efecto memoria dejado por cada muestra durante su preparación. Dicho efecto memoria se relaciona con el aporte de contaminantes realizado a la muestra “blanco” debido tanto a la composición del molino como a la composición de la muestra. Un análisis químico de la muestra “blanco”

permitirá evaluar, cuantificar y controlar los elementos aportados y su influencia sobre los resultados del método de preparación. Así, en la fase de trituración, se recomienda moler una muestra de cuarzo cada 20 muestras reales y se envía de esta forma al laboratorio para ser analizada como las demás muestras.

Entre los elementos de interés que pueden ser aportados como contaminantes por los equipos de molienda, elaborados a base de aceros o de aleaciones de carburo de tungsteno están el Fe, Cr, Ni, Mn, Mo, Co, W, Cu, Zn, otros. Idealmente, una muestra “blanco” debería tener una concentración muy baja de estos metales, por lo tanto se debe contar con un método analítico lo suficientemente sensible para poder distinguir entre la concentración real del “blanco” y el aporte por contaminación. Para tal fin, es común aplicar el criterio del Límite de Detección del método, utilizando este valor de concentración como aceptable para evaluar la contaminación de un elemento. De este modo, todos los elementos de interés, excepto el Fe, deberían tener una concentración por debajo del LD; se hace la excepción del Fe, dado que este elemento es el de mayor aporte por estar presente en todos los componentes del molino, además su abundancia en la naturaleza hace que su concentración pueda estar por encima del LD del método utilizado.

3.7. Almacenamiento de las muestras y envío al laboratorio.

Las muestras que han sido preparadas durante todos los procesos descritos anteriormente independientemente del medio de muestreo que se trate (sedimentos de corriente, suelos, llanuras de inundación o rocas) deben quedar debidamente etiquetadas a mano con rotuladores de tinta permanentes, a estas etiquetas se les puede agregar además un código QR que permite una mejor identificación y seguimiento de las mismas.

Del total de muestras que se han preparado una parte serán empaquetadas correctamente y con la protección necesaria para ser enviadas al laboratorio de análisis correspondiente, estos envíos incluirán tanto las muestras para los análisis químicos, las muestras para las determinaciones del TOC, para las determinaciones del pH y también las muestras para el control de calidad como duplicados, blancos y materiales de referencia certificados.

Por último, en todos los proyectos de geoquímica es importante que una parte de las muestras queden guardadas para el almacenamiento a largo plazo y la creación de un archivo de muestras de todos los proyectos llevados a cabo.

Estas muestras quedarán archivadas en un almacén seguro y limpio y quedarán debidamente identificadas y agrupadas por proyectos. De esta manera si se necesita volver a realizar un análisis de un determinado lugar en un proyecto serán fácilmente accesibles y reconocibles porque quedará un registro de todas las muestras con sus coordenadas.

Capítulo 4 – Análisis químico y control de calidad

4.1. Introducción

El análisis elemental de rocas y minerales es el método de trabajo de rutina más importante en geoquímica, la información que se obtiene sobre la composición elemental de los distintos materiales geológicos es fundamental para la comprensión de procesos geológicos, y es utilizada en objetivos tan variados como: evaluación ambiental y exploración mineral. El análisis químico está compuesto por diferentes etapas, entre las que se incluyen: preparación, métodos de descomposición y métodos instrumentales de análisis, todas estas etapas influyen en la calidad del resultado analítico, e imponen limitaciones o mejoras en los resultados obtenidos, como es el caso del método de digestión (Darnley et al., 1995) y/o la fracción granulométrica seleccionada para el análisis. La interpretación resultante del análisis geoquímico, depende en gran medida de la calidad de la información analítica, en este campo, es necesario que los distintos laboratorios mantengan estándares aceptables de precisión y exactitud, mediante la aplicación de protocolos de aseguramiento de la calidad (QA) y control de calidad (QC).

En este capítulo, se presenta una breve descripción de los principales métodos analíticos utilizados hoy en día en los distintos laboratorios de análisis de rocas, sedimentos, suelos y aguas. Se hace una descripción general sin desconocer que se pueden presentar variaciones según el laboratorio, la evolución en el tiempo de los métodos de ensayo, la existencia de otros materiales geológicos, y la existencia de métodos de descomposición y técnicas analíticas utilizadas en objetivos específicos. También se realiza una breve descripción de los protocolos QA/QC comúnmente empleados en las distintas campañas de evaluación geoquímica.

4.2 Análisis de campo

4.2.1. Análisis fisicoquímico de aguas

Para el caso de muestras de agua, no se requiere de una preparación adicional en el laboratorio, siempre y cuando el interés del análisis sea el de conocer la concentración total de especies iónicas solubles. Todos los procesos de preservación, filtración y prevención de contaminación se realizan en campo. Gran parte del proceso de recolección, filtración, medición de parámetros físicos y conservación de la muestra son idénticos independientemente del tipo de muestra de agua que se recolecte.

Para el análisis químico de especies solubles totales en aguas, se requieren tres fracciones de agua filtrada a menos de 0,45 μm , recolectadas en frascos de polietileno incoloro de alta densidad, y en las cuales se deben utilizar reactivos ultra puros para su preservación. El volumen de muestra a coleccionar dependerá de la técnica analítica a usar, que para el caso de técnicas modernas multielementales y simultáneas para el análisis de aniones y cationes, como son la cromatografía líquida y técnicas espectrométricas como ICP-MS e ICP-AES, el volumen requerido para el análisis es mínimo, del orden de unos pocos mililitros.

Una vez recolectadas las muestras deben mantenerse relativamente frescas, a una temperatura menor a 8°C (Sandström et al., 1998; Prieto-Rincón & Espinosa-González, 2011) aisladas de la luz, para evitar el

crecimiento de bacterias. Después de la recolección, las muestras se deben analizar en el menor tiempo posible. Sobre las tres fracciones el laboratorio realiza principalmente las siguientes determinaciones:

- Determinación de Aniones: Sobre muestra filtrada y refrigerada a $< 8^{\circ}\text{C}$.
- Determinación de Cationes: Sobre muestra filtrada, acidificada con ácido nítrico (HNO_3) y refrigerada a $< 8^{\circ}\text{C}$.
- Determinación de Mercurio: Sobre muestra filtrada, preservada con dicromato ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) de potasio disuelto en HNO_3 y refrigerada a $< 8^{\circ}\text{C}$.

Adicionalmente en campo, se toma lectura de parámetros fisicoquímicos como: potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), temperatura (T), alcalinidad, entre otros (Fig. 4.1 y 4.2) (Sandström et al., 1998; Prieto-Rincón & Espinosa-González, 2011; Darnley et al., 1995). Algunos laboratorios analíticos solicitan información de pH y CE, lo cual es necesario ya que la conductividad eléctrica en particular, permite evaluar si habrá limitantes según la técnica analítica, con el análisis de las muestras debido al alto contenido de sales disueltas.



Figura 4.1. Proceso de medición de pH, conductividad, temperatura (a). Filtración de la muestra con membrana $0,45\ \mu\text{m}$ (b). Determinación de alcalinidad por valoración. Muestras preservadas (d). Servicio Geológico de Colombia



Figura 4.2. Toma de muestras de aguas, toma de parámetros fisicoquímicos y preservación. Servicio Geológico de Honduras

4.2.2. Análisis químico de materiales geológicos sólidos mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)

En los últimos años se utilizan cada vez más a menudo en los proyectos de geoquímica los analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X (FRX). Estos analizadores permiten obtener resultados semicuantitativos y cualitativos a partir de muestras geológicas en estado sólido.

Son muy útiles, ofrecen análisis no destructivos y rápidos de la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras en el momento preciso, cuando los materiales no pueden ser transportados se requiere resultados rápidos e *in situ*. Es una excelente opción en la exploración de recursos minerales, pero hay que tener en cuenta que NO reemplaza al laboratorio; es una herramienta complementaria para los estudios geoquímicos.

En la exploración geoquímica, estos analizadores pueden utilizarse para medir muestras de suelos y rocas (Fig. 4.3), también pueden tener aplicaciones más directas a la minería como en el análisis de los testigos de perforación y en los frentes de mina.



Figura 4.3. Uso de analizadores portátiles FRX en suelos y rocas (fuente: IGME, España)

Estos equipos también pueden utilizarse en temáticas medioambientales, en las siguientes fotografías podemos observar su uso por parte del SEGEMAR en obras finales de remediación ambiental en la Puna Jujeña (Argentina) para la remoción de suelos que aún acusaban el impacto de la actividad de una fundidora cerrada en 1986 (Fig. 4.4.)



Figura 4.4. Grilla de 5 metros de lado. Elementos de interés: Cu, Pb y Zn. Foto SEGEMAR

4.3. Análisis químicos en laboratorio

4.3.1. Técnicas de descomposición de muestras

No existe un único método que cubra todos los tipos de materiales geológicos, todos los elementos químicos de interés y todos los rangos de concentración. La selección de un método de descomposición debe estar basado en parámetros como: el objetivo del estudio geoquímico, los límites de precisión y exactitud, las propiedades químicas y mineralógicas de la muestra, los elementos de interés, las limitaciones impuestas por las técnicas analíticas a utilizar (por ejemplo, interferencias, generadas por componentes principales del material geológico) y la concentración esperada de los elementos objetivo (Darnley et al., 1995).

Las descomposiciones se basan principalmente en dos métodos: digestiones ácidas y fusiones, y el proceso se realiza sobre la muestra pulverizada (<73 μm), obtenida en el proceso de preparación. Dependiendo de las características mineralógicas de la muestra y de la digestión empleada, se obtienen extracciones totales y/o parciales de los diferentes elementos. Los procesos de descomposición requieren de infraestructura y de tiempo para su ejecución, por esta razón, en geoquímica es común el uso de técnicas como la fluorescencia de rayos X (XRF) y el análisis de activación de neutrónica (INAA), debido a que, con estos métodos, se mide la cantidad total de algunos elementos, con una mínima preparación de la muestra (Darnley et al., 1995). Es importante aclarar que estos métodos analíticos no suplen completamente la necesidad de un análisis geoquímico completo, dado que en muchos casos la sensibilidad no es suficiente para cuantificar algunos elementos cuya abundancia relativa es muy baja en la naturaleza.

4.3.1.1. Digestión Ácida

Las digestiones ácidas que se utilizan en los laboratorios de análisis químico corresponden al uso de agua regia, cuando se habla de digestiones parciales y digestión por cuatro ácidos (tetra-ácido), cuando se habla de digestiones totales o casi totales. Dentro de las principales ventajas del uso de digestiones ácidas, con respecto a las descomposiciones por fusión, es que los ácidos empleados presentan un alto grado de pureza, y no añaden sales extrañas a la solución del analito, además que permiten el análisis de varios elementos en niveles de concentración de trazas y ultratrazas.

El agua regia corresponde a una mezcla de ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO_3), en una proporción 3:1, en términos generales es una digestión menos rigurosa que la obtenida con el uso de cuatro ácidos (Figura 4.5). El agua regia es un disolvente eficaz para numerosos sulfuros, arseniuros, seleniuros, telurios, sulfosales, carbonatos, y óxidos (Darnley et al., 1995), también es especialmente útil en la determinación de mercurio (Hg) ya que disuelve cuantitativamente este elemento y asegura una temperatura de digestión lo suficientemente baja para evitar la volatilización. De este modo el agua regia es una excelente herramienta para la exploración de depósitos que involucran oro (Au), plata (Ag) y metales base alojados en minerales de sulfuro, carbonato, adsorbidos en minerales arcillosos o en otras fases de fácil descomposición (Darnley et al., 1995). Para los analitos alojados en otros tipos de minerales los datos reportados deben considerarse como parciales y solo representan la porción lixiviable, a pesar de esto, y dependiendo de los objetivos del estudio geoquímico los resultados pueden ser de gran utilidad a pesar de tratarse solo del componente lixiviable, aun tratándose de elementos de difícil extracción como es el caso de las tierras raras.

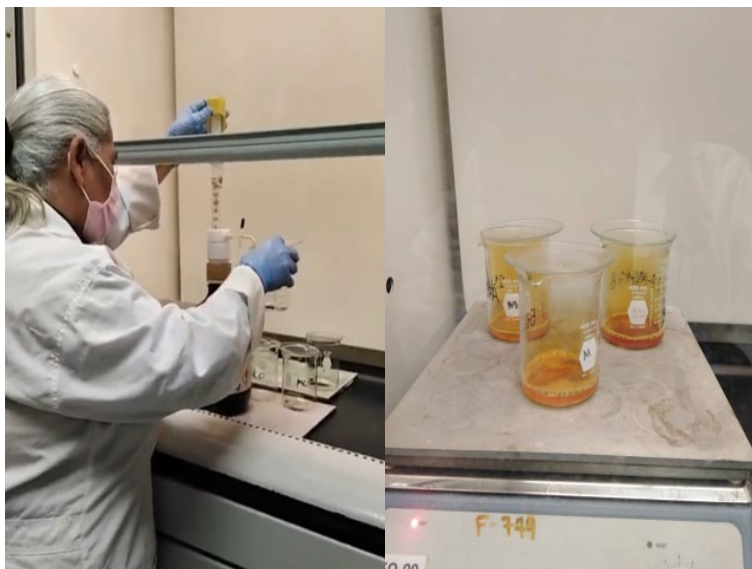


Figura 4.5. Fotografía sobre o procedimiento de digestión por agua regia.

La digestión por cuatro ácidos (tetra-acida), corresponde a una mezcla de ácido fluorhídrico, ácido perclórico, ácido nítrico y ácido clorhídrico (HF-HClO₄-HNO₃-HCl) en diferentes proporciones, las cuales pueden variar dependiendo de los objetivos del estudio geoquímico. Esta técnica de digestión, es generalmente referida como un método de extracción total, lo cual se debe, a que la digestión de cuatro ácidos disuelve cuantitativamente casi todos los minerales en la mayoría de materiales geológicos, sin embargo, minerales refractarios como la barita, cromita, espinela, berilio, zircón, turmalina, óxidos de tierras raras, columbita, tantalita y minerales de titanio, estaño y tungsteno no se extraen cuantitativamente (Darnley et al., 1995). El HF presente en la mezcla es eficaz en la descomposición de silicatos, formando fluoruro de silicio (SiF₄) el cual se volatiliza con el calentamiento, por este motivo con esta técnica de digestión se imposibilita la determinación de un elemento tan importante en análisis litogeoquímicos como es el silicio (Si). Elementos como el arsénico (As), Boro (B), Titanio (Ti), niobio (Nb), Germanio (Ge) y antimonio (Sb) también forman fluoruros, los cuales se pierden en grados variables durante la digestión (Darnley et al., 1995). A pesar de que la extracción es parcial en algunos minerales, y dependiendo de los objetivos del estudio geoquímico, los resultados pueden ser de gran utilidad a pesar de tratarse solo del componente lixiviable.

4.3.1.2. Fusiones

Los métodos de descomposición por fusión corresponden a métodos de extracción total aplicados especialmente para análisis litogeoquímicos, con estos, se garantiza la disolución total de los minerales refractarios, esto se debe, a que en el proceso se generan reacciones del tipo ácido-base y oxidación-reducción a altas temperaturas (500-1100 oC). Dentro de las principales desventajas con respecto a las digestiones ácidas, se encuentra la posible adición de contaminantes debido a la alta proporción de fundente-muestra (Darnley et al., 1995).

En los métodos modernos de análisis, se emplean principalmente las fusiones con metaborato de litio (LiBO₂) y tetraborato de litio (Li₂B₄O₇), debido su amplia aplicabilidad y eficacia a proporciones bajas de fundente-muestra (3:1). El procedimiento es bastante sencillo y corresponde a la fusión de la mezcla

fundente-muestra en un crisol de grafito o platino, a una temperatura de 1000 °C durante 30 minutos (Darnley et al., 1995). El disco fundido puede ser analizado por XRF o puede ser disuelto en HNO₃ o HCl para su posterior análisis mediante otras técnicas instrumentales. Mediante esta fusión se pueden determinar elementos mayores, menores y traza.

Los métodos de descomposición para el oro y los elementos del grupo platino (PGE) implican procedimientos específicos. Debido a la baja abundancia del Au y los PGE, la ocurrencia no homogénea y el efecto pepita, se requiere para el análisis una cantidad alta de material, además de agentes que colecten de manera eficiente los distintos elementos de interés (Hoffman et al., 1998) (Jackson et al., 1990).

El ensayo al fuego con recolección de plomo se considera la técnica más adecuada para el análisis de oro, mediante esta técnica también se determinan platino (Pt) y paladio (Pd). El procedimiento involucra la fusión a 1000 °C durante 20 minutos de la muestra mezclada con fundente (bórax), sílice, una fuente de carbono (harina) y óxido de plomo el cual se agrega como recolector. Durante la fusión los metales preciosos y el plomo se separan de la escoria de silicato formando un botón, posteriormente el Au y PGE se extraen del botón mediante un proceso conocido como copelación. Durante la copelación, el plomo en el botón se oxida y se absorbe por una copela (óxido de magnesio) dejando un botón enriquecido en Au y PGE. El botón de metales preciosos posteriormente es disuelto en HNO₃ para su posterior análisis (Hoffman et al., 1998).

El ensayo al fuego con recolección de sulfuro de níquel (NiS), es el método más adecuado para la recolección eficiente del conjunto completo de elementos PGE (Ru, Rh, Pd, Os, Ir y Pt). Mediante este método también se recolecta oro, pero con menos eficiencia que mediante el ensayo al fuego convencional con recolección de plomo. El procedimiento involucra la fusión a 1000 °C durante 1 hora de la muestra mezclada con fundente (bórax), níquel, azufre, carbonato de sodio y sílice. Durante la fusión se forma un botón de NiS que extrae los PGE. El botón enriquecido en PGE se disuelve para su posterior análisis (Jackson et al., 1990).

La ventaja de los métodos de preparación de oro y PGE descritos, radica en que, cuando se combinan con métodos instrumentales como Espectrometría de Masas Acoplado a Plasma Inducido (ICP-MS) y Espectroscopía de Emisión Atómica Acoplado a Plasma Inducido (ICP-AES), se obtienen resultados fiables con bajos límites de detección, debido a que estos metales se extraen cuantitativamente.

4.3.2. Métodos instrumentales de análisis

El objetivo principal de los métodos instrumentales de análisis en geoquímica es cuantificar los elementos de interés presentes en un material geológico. Al igual que con los métodos de descomposición, no existe un único método instrumental que cubra todos los elementos geoquímicos de interés. En este sentido, es necesario hacer una selección de los métodos instrumentales idóneos con base a criterios como analíticos como: límites de detección (LD), extracción cuantitativa del analito, rango de linealidad, sensibilidad, resolución, precisión y exactitud; todo esto con base en los objetivos del estudio geoquímico y los métodos de descomposición utilizados. En el presente apartado, se hace una breve descripción de los principales métodos instrumentales de análisis. Se hace una descripción general sin desconocer la existencia de otras técnicas analíticas, que pueden resultar relevantes en objetivos específicos.

4.3.2.1. Espectrometría de absorción atómica (AAS)

La espectrometría de absorción atómica (AAS), fue la técnica líder en análisis geoquímico hasta el surgimiento del ICP-AES a finales de los años 70. La principal razón del declive de la técnica, es que AAS solo puede determinar un elemento a la vez, y, por lo tanto, no puede competir con técnicas de determinación multi-elemento. Adicionalmente, AAS requiere dilución para los analitos concentrados, debido a un rango dinámico lineal corto, lo que conduce a una productividad reducida y un mayor error. Las principales ventajas de AAS comprenden su especificidad, simplicidad, bajo costo, robustez y relativa ausencia de interferencias. Hoy en día, las aplicaciones geoquímicas más importantes de AAS, se encuentran relacionadas con objetivos específicos, en donde la atomización de llama es reemplazada por hornos de grafito o generación de hidruros (Darnley et al., 1995).

Los elementos, que normalmente se determinan por AAS, incluyen Si, Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, Ti, Mn, Ba, Be, Co, Cr, Li, Ni, Pb, Rb, Sr, V y Zn. Elementos como Ag, Bi, Cd, Pb, Mo, Sb, As, Ga, In, Tl y Se, requieren de etapas de preconcentración, lo que mejora la capacidad de detección. El AAS de horno de grafito (GF) tiene una sensibilidad tres veces mayor que AAS, por lo que es útil en la determinación de Ag, Cd, In, Sn, Tl y Pb, sin embargo, sufre interferencias más complejas y menor productividad que AAS (Darnley et al., 1995).

4.3.2.2. Espectrometría de Emisión Atómica Acoplado a Plasma Inducido (ICP-AES)

El primer espectrómetro de Emisión Atómica Acoplado a Plasma Inducido (ICP-AES) (Fig. 4.6) se introdujo comercialmente en 1975. Su ventaja sobre la espectrometría de absorción atómica (AAS) es la capacidad de determinar varios elementos simultáneamente, en un rango de tiempo corto, adicionalmente, el amplio rango dinámico lineal de la técnica, permite la determinación de elementos sin necesidad de realizar procesos adicionales de dilución (Darnley et al., 1995).

Mediante ICP-AES, se determinan principalmente los elementos mayores, esta determinación se realiza sobre la muestra sometida al método de descomposición de fusión y posterior disolución con ácido, estos elementos representados como óxidos corresponden a Al_2O_3 , BaO, CaO, Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MgO, MnO, Na_2O , P_2O_5 , SiO_2 , SO_3 , SrO y TiO_2 . Mediante esta metodología: fusión-digestión-lectura ICP-AES, se obtienen límites de detección varios órdenes de magnitud por debajo de la concentración promedio en la corteza superior terrestre, los cuales son generalmente similares en magnitud a los obtenidos mediante la lectura por FRX-disco fundido, la ventaja de ICP-AES respecto a FRX, radica en que los límites de cuantificación superiores para la mayoría de elementos, son varios órdenes de magnitud mayores con respecto a esta última. Mediante esta técnica, también se determina comúnmente oro sobre la muestra sometida a ensayo al fuego con recolección de plomo. Con esta metodología, se obtienen los mismos límites de detección, que los obtenidos mediante lectura ICP-MS, la diferencia radica en que con ICP-AES se maneja un límite de cuantificación superior, varios órdenes de magnitud mayor a ICP-MS.

Respecto a la lectura con ICP-AES, sobre muestras sometidas a descomposición con agua regia y cuatro ácidos, los límites de detección son similares y/o superiores en la mayoría de elementos con respecto a su valor de concentración promedio en la corteza superior terrestre, sin embargo, como se ha mencionado a lo largo del presente capítulo la aplicabilidad de las distintas metodologías de análisis está determinada en función de los objetivos específicos del estudio geoquímico.



Figura 4.6. Espectrómetro de Emisión Atómica Acoplado a Plasma Inducido (ICP-AES).

4.3.2.3. Espectrometría de Masas Acoplado a Plasma Inducido (ICP-MS)

El primer instrumento comercial de espectrometría de masas acoplado a plasma inducido (ICP-MS) se introdujo en 1983. Las principales ventajas del ICP-MS son un amplio rango dinámico lineal, espectros simples, flexibilidad, capacidad para medir proporciones de isótopos, excelentes límites de detección y alta sensibilidad. Las interferencias espectrales son mucho menores que en ICP-AES, y son relativamente fáciles de predecir (Darnley et al., 1995). De las anteriores, la principal fortaleza de la técnica radica, en los bajos límites de detección, los cuales son varios órdenes de magnitud por debajo de la concentración promedio en la corteza terrestre, para todos los elementos y todos los métodos de descomposición de la muestra.

Mediante ICP-MS, se determina Au, Pd y Pt sobre la muestra sometida a ensayo al fuego con recolección de plomo, y todo el grupo de elementos PGE (Ru, Rh, Pd, Os, Ir y Pt) sobre la muestra sometida a ensayo al fuego con recolección de sulfuro de níquel. También se determinan Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Tl, Ti, U, V, W, Y, Zn, Zr y las tierras raras Dy, Er, Eu, Gd, Ho, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, y Yb sobre la muestra sometida a ataque con cuatro ácidos, en donde los elementos refractarios, en los cuales no se obtiene una extracción total, los cuales ya han sido discutidos, son de gran utilidad dependiendo de los objetivos del estudio geoquímico. La mayoría de estos elementos también son determinados por ICP-MS, sobre muestras sometidas a descomposición con agua regia, en donde el mercurio cobra vital importancia, ya que se disuelve cuantitativamente en este medio.

En estudios, en donde se requiere una extracción total de todos los elementos, como es el caso de litogeoquímica, se realiza la lectura de los elementos refractarios por ICP-MS sobre la muestra sometida a fusión y posterior digestión ácida. De este modo, con una combinación de técnicas instrumentales como ICP-MS y ICP-AES, y una combinación de distintos ataques se puede cubrir la totalidad de elementos con extracción total, necesarios para un análisis litogeoquímico.

4.3.2.4. Fluorescencia de rayos X

El ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX) se introdujo en la década de 1960, y fue empleado principalmente, en la determinación de elementos mayores y algunos elementos traza (Sr, Rb, Y, Nb y Zr) en rocas (Figura 4.7). La FRX es aplicable hoy en día, en la determinación desde el sodio (Na) hasta el uranio (U), en un rango de concentraciones desde partes por millón hasta porcentaje (Darnley et al., 1995). Dentro de las ventajas que tiene la técnica contra su competidor directo ICP-AES, se encuentra que con FRX se obtienen resultados más precisos en la determinación de Silicio (Si), y en algunas determinaciones se requiere una mínima preparación de la muestra, la principal desventaja está asociada a la determinación de elementos livianos con peso atómico menor a 11.

Mediante FRX comúnmente se realizan dos tipos de determinaciones, la primera se realiza sobre la muestra pulverizada, la cual se mezcla con un aglutinante, y se comprime para formar un disco, sobre este disco se determina generalmente As, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, S, Si, Ti, Zn Zr. La segunda metodología, corresponde a la determinación sobre un disco obtenido a partir de la muestra sometida a fusión, sobre este disco, se determinan normalmente los siguientes elementos, representados como óxidos: Al_2O_3 , BaO, CaO, Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MgO, MnO, Na_2O , P_2O_5 , SiO_2 , SO_3 , SrO y TiO_2 .



Figura 4.7. Análisis XRF usando o pFRX en bancada (Servicio Geológico de Honduras)

4.3.2.5. Activación Neutrónica (INAA)

La técnica de activación neutrónica (NAA), ha sido empleada de forma generalizada desde 1980, sus principales ventajas radican en: simplicidad, flexibilidad de manejo de un amplio rango de pesos de muestra (1-30 g), capacidad de análisis directo sin descomposición de la muestra, y relativa ausencia de efectos de la matriz. NAA es particularmente sensible en la determinación de La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb,

Lu, As, Sb, Sc, Co, Cr, Cs, Hf, Ta, Th, U, Au y PGE. La técnica tiene ventajas en el análisis de vegetación y humus, lo cual se debe a que NAA, es insensible los elementos constituyentes de la matriz orgánica (C, N, H y O), por lo que se evita la pérdida de elementos volátiles debido a la incineración durante la preparación de la muestra (Darnley et al., 1995).

En la Tabla 1, se presenta un resumen de los métodos de descomposición y método instrumental de análisis utilizado en la determinación de algunos elementos, esta es de uso tabla es ilustrativo, ya que se pueden realizar diversas combinaciones entre métodos de descomposición y método instrumental de análisis para la determinación de diversos elementos, lo cual depende finalmente de los objetivos del estudio geoquímico. En la tabla tampoco se presentan valores de límites de detección ya que estos varían de laboratorio a laboratorio.

Tabla 1. Resumen elementos y su forma común de determinación.

Método de descomposición	Lectura	Elementos analizados
Ensayo al fuego con recolección de Plomo/Disolución acida	ICP-MS/ICP-AES/NAA	Au, Pt, Pd
Ensayo al fuego con recolección de Sulfuro de Níquel/Disolución acida	ICP-MS/ICP-AES/NAA	Au, Pt, Pd, Ir, Os, Rh, Ru
Agua regia	ICP-AES	Ag, Al, As, B , Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, Hg , K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Zn.
Agua regia	ICP-MS	Ag, Al, As, B , Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg , In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr.
Agua regia	ICP-MS	Dy, Er, Eu, Gd, Ho, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb.
Tetra-ácido	ICP-AES	Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, In, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Zn.
Tetra-ácido	ICP-MS	Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr.
Tetra-ácido	ICP-MS	Dy, Er, Eu, Gd, Ho, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Yb

Fusión/Disolución acida	ICP-AES	Al ₂ O ₃ , BaO, CaO, Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, MgO, MnO, Na ₂ O, P ₂ O ₅ , SiO ₂ , SO ₃ , SrO, TiO ₂ .
Fusión/Disolución acida	ICP-MS	Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr
Disco fundido	XRF	Al ₂ O ₃ , BaO, CaO, Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, MgO, MnO, Na ₂ O, P ₂ O ₅ , SiO ₂ , SO ₃ , SrO, TiO ₂
Pastilla Prensada	XRF	As, Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, S, Si, Ti, Zn Zr
Muestra	NAA	Au, Pt, Pd, Ir, Os, Rh, Ru, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, As, Sb, Sc, Co, Cr, Cs, Hf, Ta, Th, U, Au

4.4. Aseguramiento de Calidad (QA) Y Control de Calidad (QC)

El objetivo de un programa de QA/QC es monitorear la calidad de los datos desde el muestreo en el campo hasta la generación de los resultados finales, a fin de garantizar que tanto el usuario como las partes externas confíen en la calidad de los datos obtenidos. Un programa de QA/QC correctamente diseñado e implementado identificará errores y la etapa potencial del programa donde ocurrió el error, por ejemplo, durante el muestreo, la trituración, la preparación de muestras y/o la determinación instrumental. Los errores dentro de un programa analítico son aditivos, por lo tanto, pequeños errores a lo largo del proceso de muestreo y análisis pueden resultar en grandes errores en el momento en que se obtienen los resultados analíticos finales (Piercey, 2014). A continuación, se hace una descripción general del QA/QC sin desconocer la existencia de protocolos específicos, y herramientas variadas utilizadas en la evaluación de los distintos parámetros acá enunciados.

4.4.1. Aseguramiento de la Calidad (QA)

El aseguramiento de la calidad (QA) corresponde al conjunto de actividades preestablecidas y sistemáticas necesarias para garantizar que una determinada actividad u operación alcance un grado aceptable de calidad, estas actividades actúan desde el inicio del proyecto sobre las principales fuentes de error, teniendo en cuenta su influencia, con el fin de eliminar o minimizar su efecto. En conclusión, el QA corresponde a la elaboración e implementación de protocolos de trabajo que permite prevenir problemas que podrían ocurrir eventualmente (Simón & Gosson, 2012) (Simon & Gosson, 2008).

Un programa QA debe incluir protocolos bien establecidos y socializados con indicaciones y recomendaciones orientadas a reducir el efecto de los errores. Dentro de las principales fuentes de error se encuentran los asociados a (Simón, 2006):

- Heterogeneidad geológica: correspondientes al uso de redes de exploración inadecuadas, uso de un modelo geológico erróneo, errores en la codificación de los datos, personal poco calificado, etc. Para reducir su efecto se recomienda personal altamente calificación, uso de métodos y

parámetros adecuados en el procesamiento de datos, identificar correctamente el modelo geológico, etc.

- Toma de muestras: corresponden a muestreo predominante del material blando o frágil, o de fragmentos grandes de material duro en el muestreo de canal; la orientación incorrecta de la línea de corte en el muestreo de testigo, así como el muestreo preferencial de fragmentos gruesos en muestras de testigo muy fragmentado; ignorar los contactos litológicos importantes; la introducción de sesgos en la selección de fragmentos o intervalos en el muestreo para densidad; confusiones en el etiquetado y el orden de las muestras, etc. Para reducir su efecto se recomienda usar procedimientos de muestreo que garanticen una adecuada representatividad de las muestras, conocer con exactitud la ubicación física, orientación de los sondajes y los intervalos de muestreo, adicionalmente manipular las muestras con extremo cuidado, etc.
- Preparación de las muestras: dentro de este grupo se encuentra frecuentemente el triturado y pulverizado demasiado grueso, falta de correcta homogenización de las fracciones seleccionadas, uso de técnicas de cuarteo deficientes, pulverización insuficiente, manipulación incorrecta de las muestras, sistemas deficientes de extracción de polvo y contaminación de materiales y equipos por efecto memoria cuando existen muestras mineralizadas.
- Análisis químicos o físicos: corresponden al empleo de métodos analíticos inapropiados con baja resolución y sensibilidad, metodologías y técnicas de digestión deficientes, uso de estándares inadecuados y de calibraciones deficientes o inestables, aplicación de procedimientos incorrectos de cálculo, determinación incorrecta de densidad, alteraciones en el orden de las muestras.
- Reporte de Resultados: son frecuentes el uso indistinto de variados formatos de tablas, números y símbolos; errores en las unidades de medida, errores en factores de dilución, ausencia de información sobre los métodos empleados y sus límites de detección, etc.

Para reducir el efecto asociado a los errores cometidos durante la preparación, análisis y reporte de resultados, se recomienda asegurarse que el laboratorio seleccionado cuenta con un sistema de gestión y aseguramiento de la calidad basado en normas internacionales, donde garantiza el uso de procedimientos adecuados de preparación, dispone de equipos calibrados y en buen estado, usa productos químicos y estándares confiables, utiliza procedimientos estandarizados de reporte, y mantiene sus áreas de trabajo limpias y ordenadas.

- Base de Datos: los errores están comúnmente vinculados a la digitación repetida de datos, uso de fórmulas en la numeración, codificación errónea de muestras de control de calidad, ausencia de validación de la información, identificación de las personas responsables, ausencia de información como: datos faltantes, métodos analíticos y recuperación, entre otros. Dentro de las recomendaciones para reducir su efecto se recomienda implementar un sistema de gestión de la información analítica que incluya planificar adecuadamente la estructura y el flujo de la información, establecer filtros y mecanismos de validación de la información, minimizar la digitación manual de datos, utilizar la doble entrada para los parámetros más sensibles, mantener una disciplina estricta en el completamiento de la base de datos. La correcta gestión de la información geoquímica debe involucrar tanto el almacenamiento seguro como la extracción confiable de la información georreferenciada y su información analítica asociada.

4.4.2. Control de la Calidad (QC)

El control de la calidad (QC) corresponde al conjunto de técnicas y actividades de carácter operativo, utilizadas para determinar el nivel de calidad realmente alcanzado en una operación, las cuales monitorean los posibles errores, con el fin de cuantificar o evaluar sus posibles efectos y tomar oportunamente medidas correctoras. El QC se desarrolla mediante la inserción de muestras de control en el flujo de muestras, o mediante la realización de operaciones de control, las cuales permiten la detección de problemas cuando estos ocurren a pesar de seguir fielmente los protocolos de trabajo (Simón & Gosson, 2012) (Simon & Gosson, 2008).

El programa QC corresponde a la inserción sistemática de muestras de control (muestras duplicados, blancos, materiales de referencia, muestras para reanálisis, entre otras) durante el proceso de muestreo y análisis. Las muestras de control deben ser preparadas, empaquetadas, numeradas y enviadas de tal manera que se evite, en lo posible, su identificación por parte de los laboratorios evaluados (Simon & Gosson, 2008). El objetivo de las muestras de control es evaluar la precisión, la exactitud y la contaminación.

Precisión

La precisión se define como "la proximidad de la concordancia entre los resultados de pruebas independientes obtenidos en condiciones estipuladas". Las condiciones de repetibilidad se cumplen cuando las pruebas se realizan mediante el mismo procedimiento, con el mismo observador, el mismo instrumento de medición, en las mismas condiciones de medición, la misma ubicación y se repiten durante un breve período de tiempo (Simon & Gosson, 2008).

La evaluación de la precisión se realiza mediante el análisis de muestras duplicadas, en un proyecto geoquímico se pueden relacionar tres tipos de duplicados:

- Duplicados de campo: corresponde a una muestra duplicada colectada bajo las mismas condiciones, por la misma persona y en el mismo sitio que la muestra original. Esta muestra de control se utiliza para evaluar la variabilidad en los resultados que se puede atribuir al proceso de muestreo (Johnson et al., 2018) (Simon & Gosson, 2008). siguiendo protocolos de muestreo geoquímicos reconocidos a nivel internacional, se recomienda duplicar mínimo el 10% de las muestras colectadas dentro de una campaña de muestreo.
- Duplicado de preparación: es una muestra de control obtenida en el laboratorio al dividir la muestra obtenida del proceso de trituración en dos partes idénticas. Se utiliza para definir la precisión durante esta etapa de preparación (Johnson et al., 2018) (Simon & Gosson, 2008).
- Duplicado de análisis: esta muestra de control es propia del laboratorio y se obtiene al dividir la muestra proveniente del proceso de pulverización (muestra para análisis) en dos partes idénticas. Esta muestra de control se utiliza para definir la precisión analítica (Simon & Gosson, 2008).

El método común para la evaluación de la precisión a partir de los resultados analíticos de las muestras duplicadas corresponde al uso gráfico de diferencia porcentual media MPD (Winterburn, 2018), la gráfica se construye para cada parámetro analítico trazando el promedio entre el dato original de la muestra ($X_{Original}$) y su duplicado ($X_{Duplicado}$) (ecuación 1), frente al porcentaje de la diferencia entre el valor original y el duplicado, dividió por el promedio entre ambos valores (%ER) (ecuación 2).

Eje X	$Media = \frac{1}{2} (X_{Original} + X_{Duplicado})$	Ecuación 1.
Eje Y	$MPD = \frac{(X_{Original} - X_{Duplicado})}{\frac{1}{2}(X_{Original} + X_{Duplicado})} * 100$	Ecuación 2.

Debido a que la precisión empeora drásticamente cuando la concentración disminuye, en la gráfica se incluye una línea vertical que corresponde a un nivel de concentración 10LD, por debajo de la cual no se contabilizan las fallas. En la gráfica también se incluyen los límites de control, definidos para duplicados de campo como el 30% de variación en términos de MPD, duplicados de preparación 20% de MPD y duplicados de análisis 10% de MPD. Las fallas están definidas como las parejas (duplicado-original) que presentan un valor superior al límite de control establecido; el porcentaje de fallas generalmente permitido corresponde al 10% del número total de pares. En la Figura 4.8, se presenta un ejemplo de gráfica de variación o de dispersión relativa (%MPD) para duplicados de preparación.

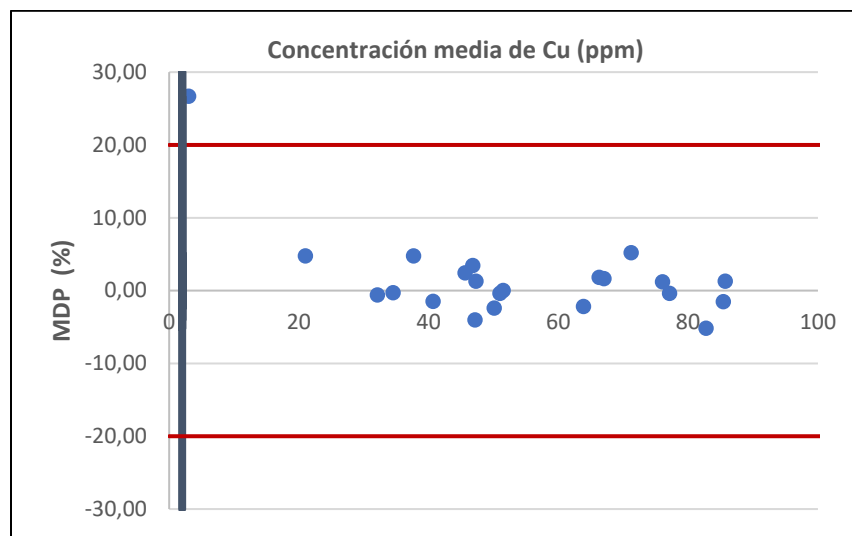


Figura 4.8. Gráfico de diferencia porcentual media para evaluación de precisión en muestras de sedimento activo (duplicados de preparación). Las líneas rojas indica una dispersión relativa del 20% de MPD, la línea gris corresponde a un nivel de concentración de 10LD. (Fuente: Servicio Geológico Colombiano)

Exactitud

La exactitud se define como la proximidad de los resultados a un valor verdadero. El concepto de exactitud está estrechamente relacionado con el concepto de "valor verdadero". El "valor verdadero" es un concepto teórico, no una medida real. Todas las mediciones tienen una incertidumbre asociada y, por lo tanto, no pueden proporcionar el "valor verdadero" (Simon & Gosson, 2008).

En los estudios geoquímicos, la exactitud se mide a través de la inserción de materiales de referencia certificados (CRM), los cuales generalmente se preparan a partir de materiales naturales, concentrados o relaves metalúrgicos. Al establecer el mejor valor de estos materiales, nunca se conoce el valor verdadero; sin embargo, en condiciones muy controladas, el 'mejor valor' de un elemento particular en un CRM se

puede establecer con un nivel de confianza suficiente (95%), a través de múltiples mediciones en laboratorios certificados (Simon & Gosson, 2008) (Johnson et al., 2018).

El método comúnmente utilizado para evaluar la exactitud a partir de resultados analíticos de CRM corresponde al uso de Cartas control Shewhart, las cuales son generadas para cada analito de cada material de referencia. La carta de control está definida por el mejor valor (valor conocido del material de referencia) y los límites de control, los cuales definen si el análisis está dentro de un control estadístico aceptable, y están definidos de la siguiente manera:

- Límite inferior de control: Corresponde a ± 2 veces la desviación estándar conocida del material de referencia.
- Límite superior de control: Corresponde a ± 3 veces la desviación estándar conocida del material de referencia.

Una vez se establece el mejor valor y los límites de control, los valores medidos del material de referencia son graficados en una secuencia temporal. En Figura 4.9 se presenta un ejemplo de gráfica carta de control.

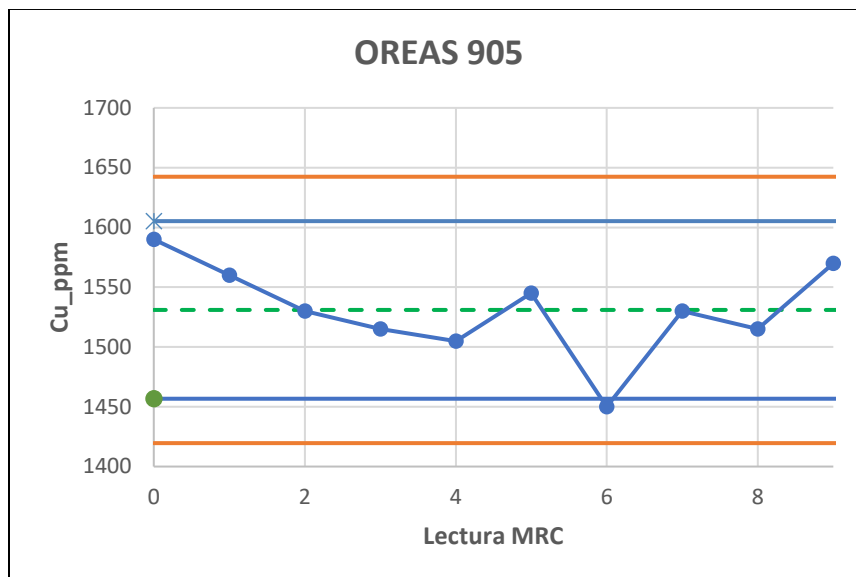


Figura 4.9. Carta de control para Cu en sedimento. La línea punteada verde indica el mejor valor, las líneas azules los límites de control inferior y las rojas los límites de control superior. (Fuente: Servicio Geológico Colombiano)

Aunque existen diversas formas para interpretar las cartas de control, existen dos reglas rigurosas que se deben seguir al monitorear los datos (Piercey, 2014):

1. Cualquier valor único que se encuentre fuera de 2 desviaciones estándar del mejor valor, o cuatro muestras en una fila que se encuentren fuera de una desviación estándar con sesgo positivo o negativo, debe señalar una alerta para monitorear los datos más de cerca.
2. Cuando se presentes dos valores seguidos fuera de 2 desviaciones estándar o una muestra fuera de 3 desviaciones estándar del mejor valor, se debe realizar una auditoría a los métodos de muestreo y de laboratorio.

Evaluación de la contaminación

La contaminación se determina a través de muestras blanco, los cuales se utilizan para analizar la contaminación introducida durante la preparación y el análisis de la muestra. La contaminación puede ocurrir en cualquier etapa durante la preparación de la muestra y el proceso analítico (Piercey, 2014), por lo que las muestras blanco se introducen como blancos gruesos, con los cuales se evalúa la contaminación durante la preparación, y blancos finos, con los cuales se evalúa la contaminación durante el análisis.

Un blanco es un material que contiene concentraciones nulas o extremadamente bajas del elemento o elementos de interés. En los estudios geoquímicos, los blancos generalmente consisten en rocas relativamente inertes como cuarcita, granito o rocas volcánicas y arena gruesa. Como regla general en blanco siempre debe insertarse después de una muestra altamente mineralizada.

La evaluación de contaminación se realiza mediante el uso de cartas control, en estas se gráfica el número de lectura en el eje X contra la concentración medida en el eje Y, el límite de control está definido por el valor de seguridad del blanco el cual corresponde a 3LD para blancos finos y 5LD para blancos gruesos. Se considera que se ha producido un nivel significativo de contaminación de un elemento cuando el número de fallas es superior al 2%. En Figura 4.10, se presenta un ejemplo de carta de control para evaluación de blancos.

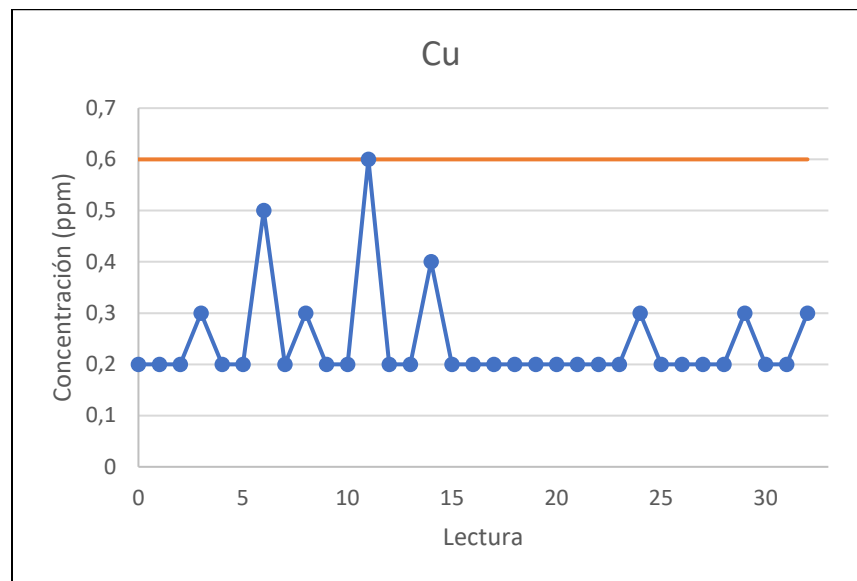


Figura 4.10. Carta de control para la evaluación de blancos de Cu en sedimento. La línea naranja corresponde a 3LD y es el criterio de rechazo o aceptación del blanco. (Fuente: Servicio Geológico Colombiano)

La frecuencia de la inserción de duplicados, material de referencia y blancos depende de la naturaleza del estudio geoquímico para el que se utilizarán los datos. Todas las indicaciones relacionadas con frecuencia de inserción, tipos de MRC, blancos y duplicados deben estar relacionadas en el protocolo QA/QC definido por cada entidad.

En relevamientos geoquímicos regionales como el llevado por el SEGEMAR, la recolección y el procesamiento de las muestras son monitoreados con procedimientos de control de calidad. Cada serie de 40 números de las tarjetas de muestreo incluye dos duplicados de campo, dos duplicados de laboratorio, dos patrones internacionales (standard) y un blanco (SEGEMAR, 2001), (Fig. 4.11)

Ejemplo del Esquema del Control de calidad del muestreo del SEGEMAR. Normativa para la Carta Geoquímica de la Rep. Argentina, 2001					
#	Etiqueta	Control de calidad	#	Etiqueta	Control de calidad
1	VD44901	Blanco	21	VD44921	
2	VD44902		22	VD44922	
3	VD44903		23	VD44923	
4	VD44904		24	VD44924	
5	VD44905	Dupl de campo	25	VD44925	
6	VD44906		26	VD44926	Dupl de campo
7	VD44907		27	VD44927	
8	VD44908	Dupl de campo de VD44905	28	VD44928	Dupl de campo de VD44926
9	VD44909		29	VD44929	
10	VD44910		30	VD44930	Dupl de laboratorio de VD44926
11	VD44911	Dupl de laboratorio de VD44905	31	VD44931	
12	VD44912		32	VD44932	
13	VD44913		33	VD44933	
14	VD44914		34	VD44934	
15	VD44915		35	VD44935	
16	VD44916	Standard	36	VD44936	
17	VD44917		37	VD44937	
18	VD44918		38	VD44938	
19	VD44919		39	VD44939	Standard
20	VD44920		40	VD44940	

Figura 4.11. Ejemplo del control de calidad del muestreo geoquímico en el SEGEMAR

La mayoría de los laboratorios analíticos como parte de su sistema de gestión y aseguramiento de la calidad, implementan su propio programa QA/QC (ISO/IEC 17025). El aseguramiento y el control de calidad en el laboratorio se realizan por medio de la implementación de procedimientos bien establecidos, con lo cual se garantiza la confiabilidad de los resultados. Para el aseguramiento de la calidad se realizan principalmente las siguientes actividades:

- Uso de cadenas de custodia.
- Registros de pesos, análisis y resultados.
- Registro de no conformidad y trabajo no conforme con sus acciones correctivas.
- Uso de manuales e instructivos de procedimientos disponibles para cada actividad.
- Uso de tablas de verificación de actividades como: limpieza y mantenimiento de instrumentos y equipos, calibración periódica de equipos e instrumentos de medición, revisión de vigencia de soluciones preparadas, verificación de la limpieza y orden de cada área de trabajo, condiciones de las instalaciones: iluminación, humedad, temperatura, mediciones diarias de parámetros de equipos como flujos y temperaturas.

Respecto al control de calidad de los ensayos, se realizan principalmente las siguientes actividades:

- Calibración de equipos y verificación de la calibración mediante el uso de patrones de calibración certificados con rango de error aceptable.

- Definición de límites de detección de equipos
- Uso de muestras de control como: duplicados, blancos de calibración, blancos del método, blancos de enjuague y materiales de referencia.
- Evaluación de resultados QC mediante criterios como: desviación estándar, coeficiente de variación, coeficiente de variación de Horwitz, cartas de control.

Capítulo 5 - Tratamiento estadístico de datos geoquímicos

Los datos geoquímicos se caracterizan por representar fenómenos a diferentes escalas de trabajo. En muchos casos, resulta difícil recopilarlos e integrarlos debido a su heterogeneidad, ya sea por el tipo de muestreo, matriz, técnica analítica, entre otros. Los conjuntos de datos geoquímicos a menudo contienen cientos de observaciones y cada una de ellas cuenta con información de más de 50 analitos que, para el tratamiento estadístico, corresponden a variables comúnmente continuas. Afrontar el desafío de integrar adecuadamente los datos geoquímicos, brinda la oportunidad de descubrir una serie de procesos geoquímicos asociados con la litología, mineralización, alteración, meteorización, actividad biológica, antrópica, etc.

El modelamiento estadístico se caracteriza por dos hechos esenciales: la gran cantidad de datos a ser interpretados y la calidad de estos datos. A su vez, todo está condicionado por la calidad de las muestras colectadas y la buena planeación de los programas de muestreo (Rivera, 2007). Los métodos de análisis de datos y visualización estadística, combinados con sistemas de información geográfica, proporcionan un entorno eficiente para la identificación de procesos y el descubrimiento de patrones geoquímicos en estos grandes conjuntos de datos.

En el análisis e inspección de los datos se hace uso de la estadística descriptiva buscando obtener así los parámetros que distinguen las características de un conjunto de datos. Asimismo, se formulan recomendaciones de cómo resumir en forma clara y sencilla, los datos de una investigación en tablas, figuras o gráficos (Rendón-Macías et al., 2016).

Los métodos modernos de evaluación y procesamiento de datos geoquímicos para identificar asociaciones minerales, estructuras y patrones se agrupan bajo el término de "minería de datos". La minería de datos incluye la aplicación de análisis multivariado de datos y otras técnicas estadísticas que, combinadas con sistemas de información geográfica, facilitan significativamente la tarea de interpretación de datos y posterior construcción del modelo geoquímico de un área de interés.

Los datos geoquímicos requieren un manejo especial cuando se requieren medidas de asociación. Debido a su naturaleza composicional, se requieren eliminar los efectos del cierre en los datos geoquímicos. Los métodos exploratorios multivariados incluyen: matrices de gráficos de dispersión, ajuste de datos censurados y faltantes, detección de valores atípicos, cálculo de medias sólidas, correlaciones y covarianzas, análisis de componentes principales (ACP), análisis de conglomerados e índices basados en asociaciones. Los métodos multivariados incluyen el análisis discriminante, análisis de varianza, árboles de clasificación y regresión, redes neuronales y otras técnicas relacionadas.

En todos los casos, el análisis inicia con un análisis exploratorio de datos (EDA). Turkey (1977) muestra una forma de realizar un EDA basado en un conjunto de técnicas estadísticas, cuya finalidad es conseguir un entendimiento básico de los datos, permitiendo detectar características relevantes y valores atípicos. Ferrer et al. (1992) describe las características principales del EDA: a) Potenciación de técnicas gráficas, b) Maximización de la resistencia y robustez de los indicadores, c) Minimización de los supuestos previos a la aplicación de técnicas de contraste y ajuste d) Facilitar el uso de transformaciones sobre los datos originales y e) Atención especial a los residuales generados en el proceso de análisis.

En el análisis de datos geoquímicos se manejan dos conceptos importantes como son el Límite de Detección (LD) y los datos censurados (Keith et al., 1983). Generalmente el LD es definido como la cantidad o concentración mínima de una sustancia (analito) que puede ser detectada con fiabilidad por un método analítico determinado (Boqué, R., 2004). De este modo, los valores de concentración por debajo del LD son conocidos como “datos censurados” y deben ser tratados antes del análisis exploratorio de datos, para lo cual la Environmental Protection Agency (EPA, 2006) da las siguientes recomendaciones generales:

- Si el porcentaje de datos censurados es menor al 15% del total, reemplace por LD / 2, LD o utilice el método máxima verosimilitud (MLE).
- Si el porcentaje va de 15% a 50%, use el método MLE.
- En caso de que el porcentaje de datos censurados oscile entre 50% y 90%, se debe realizar la estimación de los percentiles situados por encima del % censurado. En términos generales, un porcentaje tan alto de datos censurados no permite una evaluación estadística integral y no se recomienda su uso para el modelamiento.

Otros métodos también recomendados para el tratamiento de datos censurados son el método de Kaplan-Meier (KM) y el método de regresión log-probit (LPR) (Helsel, 2010; Hewett & Ganser, 2007).

Los problemas comunes que ocurren en los datos geoquímicos son: 1. Elementos con distribución censurada, lo que significa que los valores inferiores al límite de detección solo se pueden informar como menores a dicho límite. 2. La distribución de los datos no se ajusta al modelo de distribución normal. 3. Datos con valores perdidos, es decir, que no todos los especímenes fueron analizados para el mismo número de elementos, lo que puede crear complicaciones en las aplicaciones estadísticas. 3. Combinar grupos de datos que muestran diferencias distintivas entre elementos. Este puede ser el resultado de diferentes límites de detección, instrumentación o procedimientos deficientes que no garantiza el control de la calidad (QA/QC). En consecuencia, se requiere la nivelación de los grupos.

Estos problemas comunes crean dificultades al aplicar procedimientos matemáticos o estadísticos a los datos. En el caso de límites de detección variables, los datos deben separarse en grupos originales, para que se puedan realizar los ajustes apropiados a cada grupo de datos. Para los problemas con distribuciones censuradas, existen procedimientos para estimar los valores de reemplazo.

5.1. Técnicas de *Leveling* en Cartografía Geoquímica Regional

Dentro del proceso de elaboración de proyectos de cartografía geoquímica a escala nacional o regional, la utilización de múltiples *sets* de datos en la generación de mapeo geoquímico, es bastante común y el acondicionamiento de los datos analíticos de estos *datasets* es un paso fundamental e incluye entre otros factores, la caracterización de cada *set* de datos a utilizar, la compilación y homogenización de los mismos, el análisis de control de calidad y finalmente la revisión de sesgos o efectos de *batch* entre ellos. En su etapa final, este acondicionamiento, puede involucrar en algunos casos, el ajuste matemático de los *datasets* empleados para subsanar posibles efectos de *batch* detectados y este proceso es conocido como *leveling*.

Los efectos de *batch* que buscan ser subsanados mediante *leveling* son de diversa índole; variabilidad temporal, cambios en tiempos de reacción y/o temperaturas, diversidad en laboratorios, técnicas analíticas, ataques químicos, cambios en la granulometría del material y mejoras en límites de detección, entre otros (Daneshfar and Cameron, 1998; Pereira et al., 2015). Precisamente los adelantos o mejoras en los límites de detección de las diferentes metodologías analíticas repercuten en mejoras en la resolución de los datos a bajas concentraciones y a generar efectos de *batch* con respecto a los datos más

antiguos. Esto tiene un efecto más significativo sobre los elementos traza y principalmente en aquellos donde su abundancia natural en corteza es baja con respecto a los límites de detección (Johnson et al., 2008).

Las técnicas más relevantes de *leveling* varían en su complejidad. Dentro de las más simples se destacan la media y mediana, que implican la división de cada grupo de datos por sus propios parámetros de tendencia central. También existe el *leveling* por Z-score en el cual cada resultado es transformado con base en el Z-score de su grupo y el *leveling* por Gauss que ajusta los datos a una distribución normal. Existen variaciones robustas o no paramétricas de estas técnicas de *leveling*, las cuales se dejan afectar en menor medida por *outliers* como es el caso del Z-score robusto, donde la media es substituida por la mediana y la desviación estándar es reemplazada por el rango intercuartílico. Adicionalmente, se realizan métodos de *leveling* por normalización matemática empleando un modelo de regresión lineal, construido a partir materiales de referencia secundarios incluidos en cada *batch* de análisis durante largos periodos de tiempo y con base en los resultados de estos estándares, realizar el *leveling* para cada elemento químico (Johnson et al., 2008).

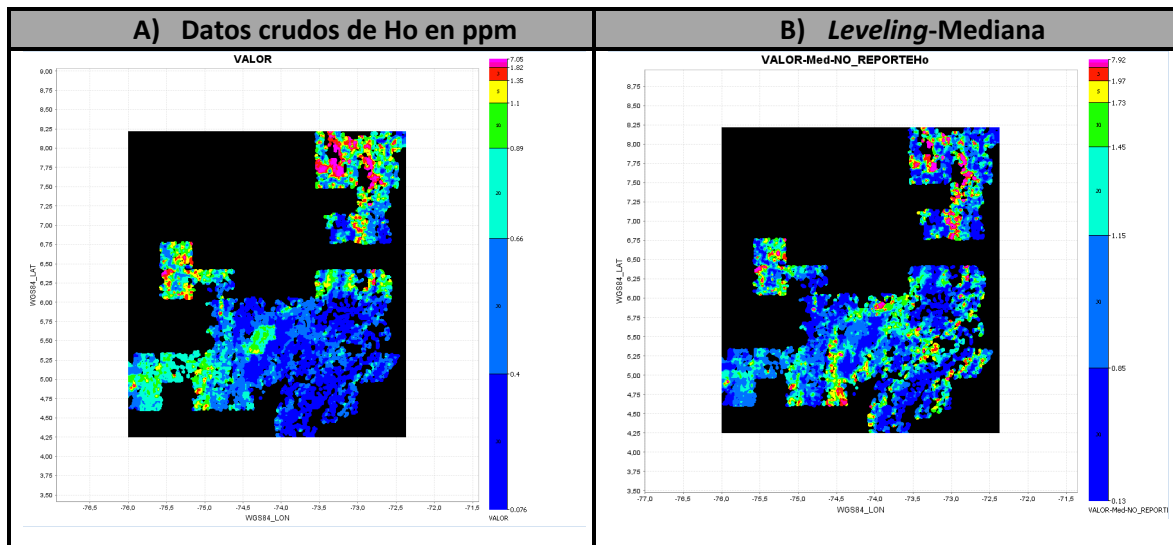
Recientemente, han surgido nuevos métodos de *leveling* que incluyen la utilización de unidades de comparación espacial las cuales corresponden a unidades geológicas y a elaborar diagramas de densidad en cada unidad de comparación tanto para el *dataset* de referencia como para el *dataset* que se desea nivelar con el fin de detectar sesgos en cada unidad. Posteriormente, obtener la ecuación de *leveling* construida a partir de un modelo de regresión lineal con las medianas de cada unidad de comparación espacial y finalmente realizar el *leveling* y verificación nuevamente, del ajuste de los datos mediante los diagramas de densidad (Pereira et al., 2015). De igual manera, y como se ejemplifica más abajo, han mostrado ser muy útiles los métodos basados en diagramas de dispersión cuantil-cuantil, los cuales se generan con base en los pares de cuantiles del mismo elemento para los datasets y sobre este obtener la ecuación de *leveling* (Daneshfar et al 1998, Grunsky, 2010; Pereira et al., 2016; Habibnia et al., 2020).

Dentro de la metodología utilizada en proyectos de cartografía geoquímica, y luego de haber surtido todos los procesos de control de calidad, una de las validaciones primordiales de los mapas de distribución elemental, se realiza evaluando la concordancia de la información geológica y las tendencias de las estructuras regionales con las múltiples interpolaciones elementales; este ejercicio permite a su vez, identificar rápidamente efectos de *batch* gracias a las interpolaciones con la información cruda, detectando patrones anómalos o formas regulares que no responden a la naturaleza geológica del medio de muestreo. Luego de identificar los efectos de *batch* se deben evaluar los factores que pueden generar dicho efecto y profundizar mucho más en variables como fecha de análisis químico, laboratorio de análisis, método de digestión de la muestra, técnica analítica, límites de detección o granulometría, entre otros y en lo posible apoyarse en diagramas tipo *boxplot*, gráficos de probabilidad, histogramas y dispersogramas, para finalmente encontrar la causa del efecto *batch* y posteriormente evaluar la aplicación de *leveling*. En este sentido, es recomendable conocer a fondo todos los detalles que están asociados a las metodologías analíticas y asegurarse de contar con toda la información, para de esta manera determinar cuándo es posible realizar o no el proceso, puesto que contando con esta información primaria es posible descartar rápidamente casos comunes como el Zr o algunos elementos refractarios, analizados mediante ataques químicos parciales como agua regia frente a ataques totales como fusión.

Después de evaluar sobre cuales sets de datos es viable practicar el *leveling*, se debe seleccionar el set de referencia que va a servir de base para realizar el proceso, teniendo en cuenta que debe tener cercanía espacial con el set de datos a nivelar y, en la medida de lo posible, contar con técnicas analíticas modernas o de alta resolución y procesos de digestión totales o pseudo-totales. Posterior a la selección del set de datos de referencia, inicia el proceso de *leveling* con todas las técnicas de nivelación que puedan aplicarse,

con el fin de evaluar cuál de ellas arroja los mejores resultados para finalmente seleccionar la más adecuada. En este sentido, se debe tener en cuenta que la selección de la metodología más simple y con buenos resultados, tiene ventaja sobre las demás al presentar menor manipulación en los datos, además, se recomienda tratar de aplicar la misma metodología a la mayoría de variables posibles. Adicionalmente, si es una opción utilizar algunos testigos del *dataset* problema, estos se pueden utilizar para hacer un re-análisis sobre algunas muestras representativas por las mismas metodologías del *dataset* de referencia y empleando estos resultados construir la ecuación de nivelación o, si no se tienen testigos, y hay posibilidad de ir al campo, hacer un re-muestreo selectivo donde se tenga representatividad del área y emplear dichos resultados para el *leveling*. Cabe señalar que muchas de estas condiciones son rara vez aplicables o económicamente inviables, y es precisamente en proyectos de mapeo geoquímico regional o nacional donde estos métodos de *leveling* se vuelven imprescindibles

En la Figura 5.1.1 (A superior) se observa un ejemplo para el elemento Ho con un efecto de *batch* muy marcado en forma de “S”, que corresponde a un lote de muestras de la cordillera oriental en la región andina de Colombia (departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Santander), el cual fue analizado en un laboratorio diferente al resto de muestras del área. Adicionalmente, al NE de este, se evidencia otro efecto de *batch* en forma rectangular por causa de cambios en tiempos de reacción y aumento en la temperatura de extracción en una metodología analítica con ataque tetra-ácido y lectura por ICP-MS. En los gráficos de *boxplot* y probabilidad (Figura A media e inferior) el diagrama rojo (izquierda) corresponde al lote anómalo en forma de “S”, el cual presenta concentraciones medias superiores en comparación con el *boxplot* morado (derecha) correspondiente al lote de análisis que rodea completamente al primero. Al aplicar el *leveling* por mediana en este caso, se observa como el efecto de *batch* desaparece en la Figura 5.1.1 (B superior) y empiezan a ser visibles algunas tendencias geoquímicas regionales con tendencia NE.



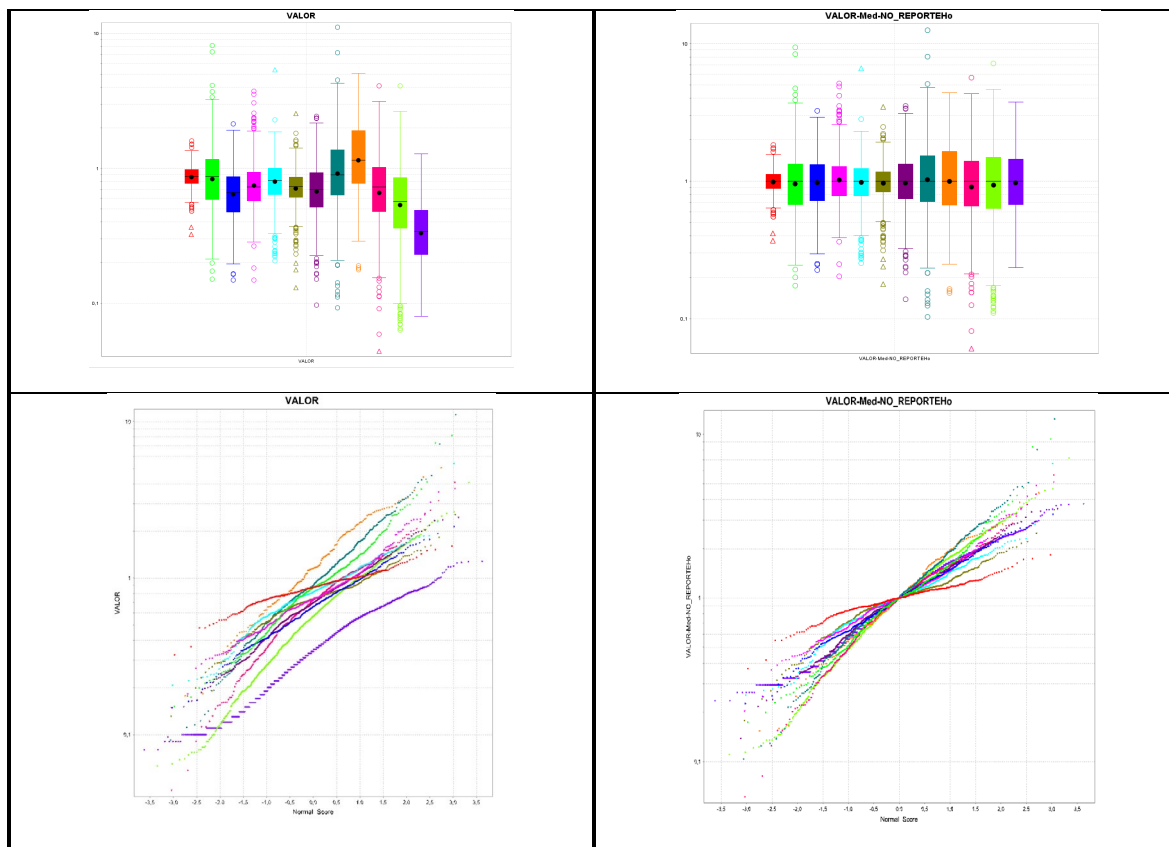


Figura 5.1.1. Esquema de Ho: A) Datos crudos B) Datos nivelados por mediana. En ambos casos se muestran los diagramas de caja y bigotes y de probabilidad.

Otro ejemplo de Leveling de datos geoquímicos se muestra con información proveniente del Servicio Geológico de Brasil, utilizando sedimentos activos de corriente colectados en la provincia de Borborema, Bloque Seridó, Brasil.

En esta región afloran varios tipos de rocas que de forma simplificada, se pueden agrupar en: (1) granitoides, gneis y migmatitas de edad paleoproterozoica; (2) granitos, gneises, migmatitas y metasedimentos neoproterozoicos; y (3) coberturas sedimentarias y lateríticas del Cuaternario. En este ambiente se realizaron levantamientos geoquímicos entre los años 2006 e 2008 con la misma metodología de campo en 10 hojas, a escala 1:100 000, totalizando 2959 muestras en un área de 30.000 km². De estos, (a) 852 muestras fueron analizadas en AcmeLabs (actualmente Bureau Veritas – Mineral Laboratories, Vancouver, Canadá) entre 2007 y 2008; y (b) 2107 muestras fueron analizadas en el laboratorio SGSGEOSOL, Vespasiano, Minas Gerais, Brasil. El área es un terreno predominantemente “granítico”, con diferentes tipos de gneises, migmatitas y granitoides, con edades que van desde el Proterozoico hasta el Neoproterozoico; y secuencias metasedimentarias neoproterozoicas y coberturas cuaternarias subordinadas. La geología del área fue integrada y compatibilizada por Cavalcante et al. (2016).

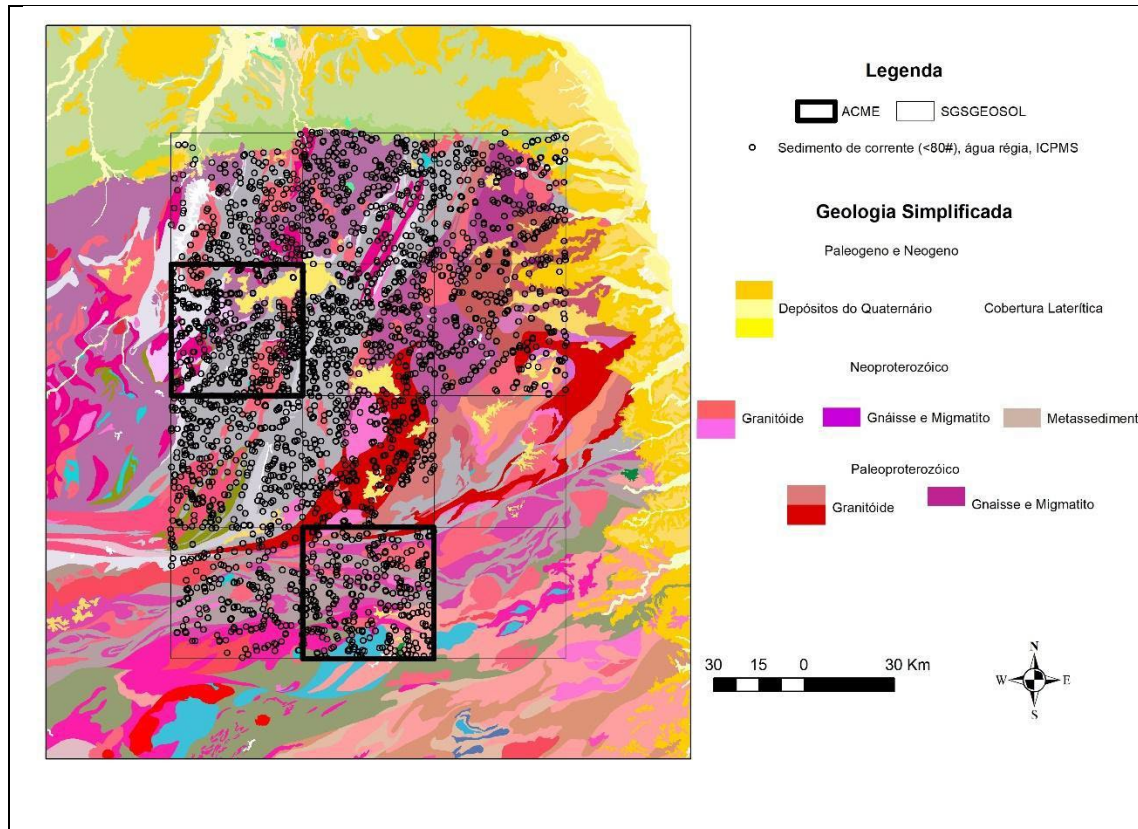


Figura 5.1.2: Área estudiada con base geológica simplificada, puntos de muestreo, hojas a escala 1:100.000 y laboratorios utilizados.

Las muestras de sedimentos de la corriente se procesaron utilizando la misma metodología:

- Sedimento activo de corriente
- Fracción < 80#
- Pulverización para la fracción < 150#
- Digestión con agua regia
- Análisis de 53 elementos con una combinación de instrumentos ICP-OES e ICP-MS. Son ellos: Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, CD, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr.

Sin embargo, el muestreo, la preparación y el análisis se realizaron durante varios años y en diferentes laboratorios. Se notó un serio problema de nivelación entre los datos, principalmente por el cambio de laboratorio contratado. La Figura 5.1.3 presenta como ejemplo el comportamiento de la plata (Ag) en el área de estudio, teniendo en cuenta los datos originales (raw data). Habiendo elegido los resultados de plata más bajos en el histograma de la Figura 5.1.3 (Ag, barra resaltada a la izquierda del Histograma) se observa que ciertos mapas topográficos contienen la gran mayoría de resultados para este elemento químico, mientras que otras hojas no presentan estos resultados o presentar sólo valores aislados. Esto

ocurre tanto para resultados obtenidos en diferentes laboratorios como para resultados obtenidos en el mismo laboratorio (pero enviados en tiempos diferentes).

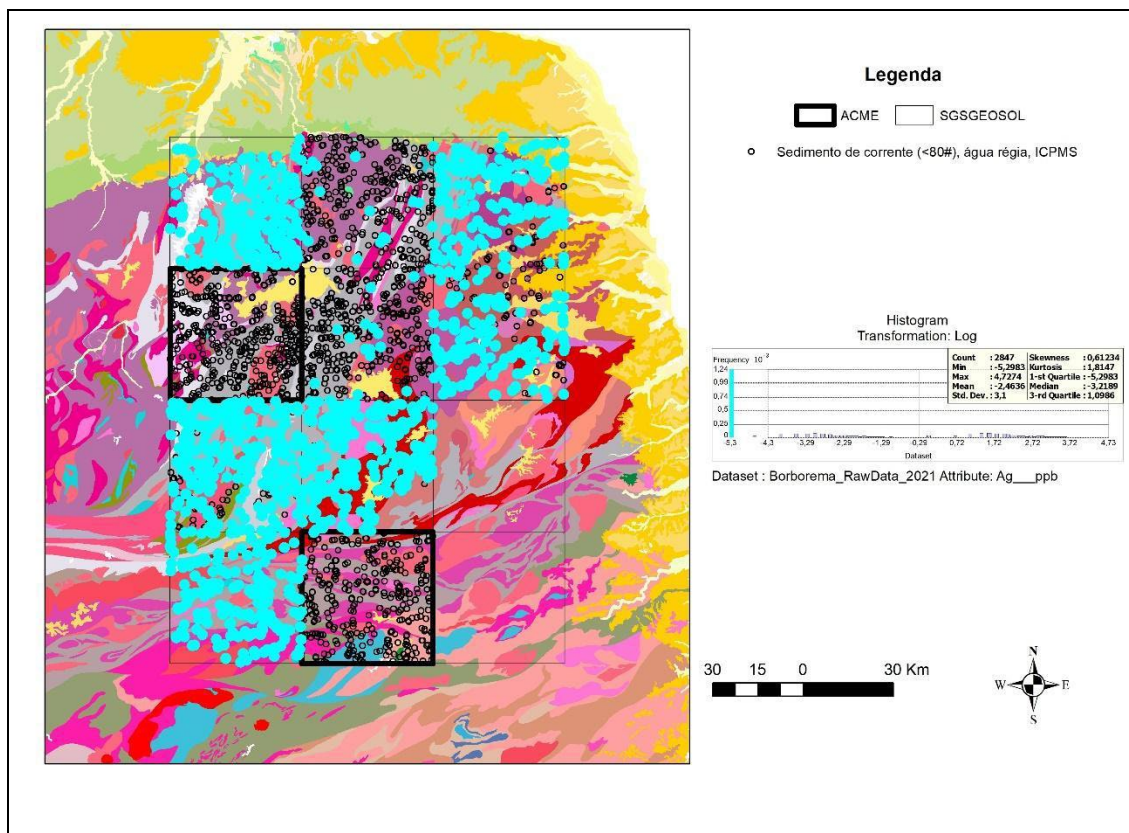


Figura 5.1.3 - Resultados brutos para plata (Ag) donde se seleccionaron los valores más bajos encontrados en los análisis de los laboratorios Acme y SGSGEOSOL.

La Figura 5.1.4 presenta los valores originales de plata (Ag) (raw data) clasificados según 5 clases de tenores. Análogamente a la figura anterior, es posible observar que los resultados obtenidos en las hojas analizadas en el laboratorio Acme son sistemáticamente superiores a los obtenidos en las hojas analizadas por el laboratorio SGSGEOSOL, independientemente de la geología existente.

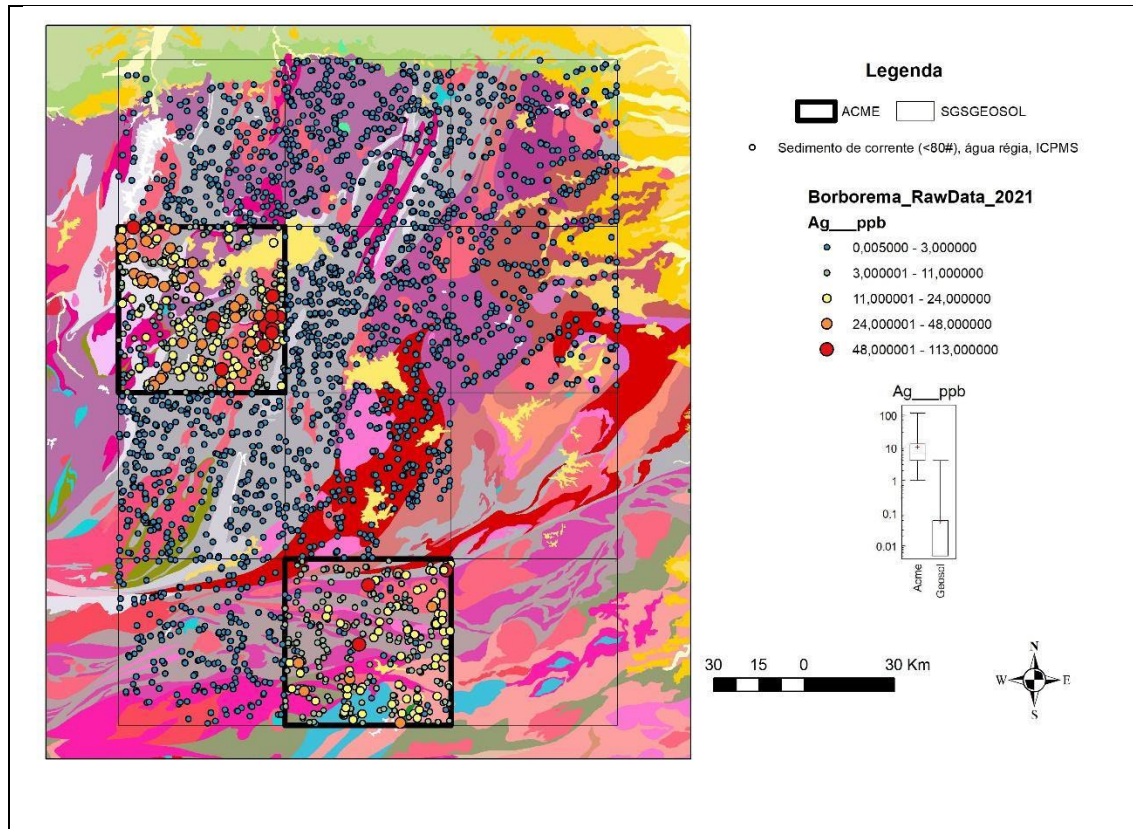


Figura 5.1.4. Distribuição de prata (Ag), dados originais (*raw data*), em el área de estudio.

Utilizando la metodología de nivelación propuesta por Daneshfar & Cameron (1998), se seleccionaron bandas de 5 km y 10 km entre las hojas Currais Novos (analizada por el laboratorio Acme, al norte) y la hoja Jardim Seridó (analizada por el laboratorio SGSGEOSOL, al sur). Luego se aplicó la técnica de regresión por cuantiles a cada una de las bandas de las hojas antes mencionadas (Figura 4). Los rangos elegidos deben tener, en lo posible, una geología similar en los rangos de ambas hojas para asegurar que la variación entre las concentraciones de los valores considerados para cada uno de los elementos estudiados sea comparada de modo efectivo.

Se realizó un análisis de regresión para los cuantiles de las bandas de 5 km y 10 km (Figura 4), determinando el parámetro “D”, que indica cuál de las bandas se aplica mejor para la nivelación de los diferentes conjuntos de datos. El parámetro “D” se define como:

$$D = \sum w_i [(q_i)_e - (q_i)_{e'}]^2, \text{ donde}$$

w_i = peso asignado al primer cuantil,

$(q_i)_e$ = primer cuantil en la banda de espesor y

$(q_i)_{e'}$ = primer cuantil en la banda de espesor en las hojas en estudio

e = espesor de banda expresado como una medida de distancia (en nuestro ejemplo, 5 km y 10 km).

Los pesos favorecen los pares de cuantiles más cercanos a la mediana de la distribución (percentil 50%), atenúan los valores más extremos (sean muy bajos o muy altos) y se basan en el ordenamiento de una distribución normal (peso para el valor medio) es 0.399; ver Tabla 1).

Para la banda de 5 km en cada hoja mapeada se observaron 31 resultados obtenidos en el laboratorio Acme y 40 resultados obtenidos en el laboratorio SGSGeosol. Para la banda de 10 km en cada hoja mapeada se observaron 87 resultados obtenidos en el laboratorio Acme y 76 resultados obtenidos en el laboratorio SGSGeosol. La Tabla 2 presenta los valores cuantiles y algunos parámetros estadísticos para ambos casos, tomando como ejemplo el elemento aluminio (Al).

Tabla 1: Pesos utilizados para la regresión por cuantiles en la nivelación de datos.

Pesos aplicados na Regressão											
Quantil	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95
Peso aplicado	0,26	0,44	0,7	0,87	0,97	1	0,97	0,87	0,7	0,44	0,2

Tabla 2: Valores de los cuantiles y respectivos pesos aplicados para el cálculo del factor D parcial y total considerando las bandas de 5 km y 10 km de espesor.

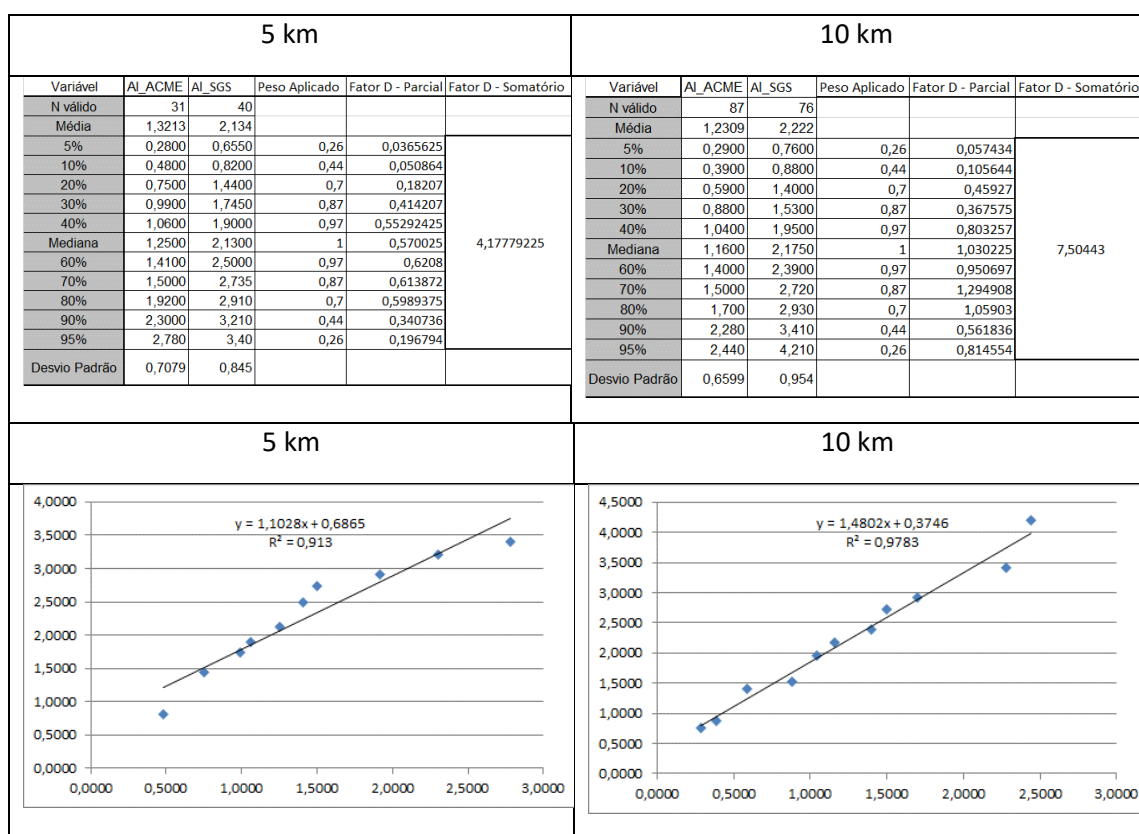


Figura 5.1.5: Gráficos binarios donde es posible observar la correlación entre los resultados obtenidos para el aluminio (Al) en las bandas con espesor de 5 km y 10 km para análisis en los laboratorios Acme y SGSGeosol. En el eje X están los datos obtenidos de Acme; en el eje Y se encuentran los datos obtenidos del SGSGeosol.

La Figura 5.1.5 presenta los gráficos binarios donde se puede observar el grado de correlación de los cuantiles utilizados en los cálculos para las bandas de 5 km y 10 km de espesor en el área de estudio. De los gráficos se puede observar que la banda de 10 km presenta mejor correlación y los resultados de esta regresión sirvieron para ajustar los valores de Al entre las hojas con muestras analizadas por el laboratorio Acme y SGSGeosol. De los 53 elementos analizados en este trabajo, los siguientes elementos también

mostraron resultados satisfactorios: Al, Ba, Be, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, K, La, Li, Mg, Mn, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, U, V, Y, Zn y Zr. Para algunos elementos se observó una correlación no lineal (por ejemplo, Bi y Fe) y el método debe usarse con reservas. De hecho, este método debe utilizarse siempre con mucho cuidado y teniendo en cuenta, siempre que sea posible, el conocimiento del sustrato rocoso.

Cabe señalar que los elementos que tienen muchos valores censurados (por debajo del límite de detección y/o tienen valores distribuidos en niveles en los gráficos de distribución normal, por ejemplo Bi, Fe) no son susceptibles de nivelación. A pesar de tener una ecuación de regresión calculada y un índice “R” relativamente alto, la distribución de puntos en el gráfico indica que la correlación es muy pobre entre los resultados obtenidos en los dos laboratorios utilizados en este trabajo. La figura 6 presenta como ejemplo el caso del elemento antimonio (Sb).

Desafortunadamente, esto sucedió con los elementos más importantes en los estudios geoquímicos prospectivos y ambientales. Así, para Ag, As, Au, B, Ca, Ge, Hf, Hg, In, Mo, Pd, Pt, Re, S, Sb, Se, Ta, Te, Tl y W este método no presentó resultados satisfactorios.

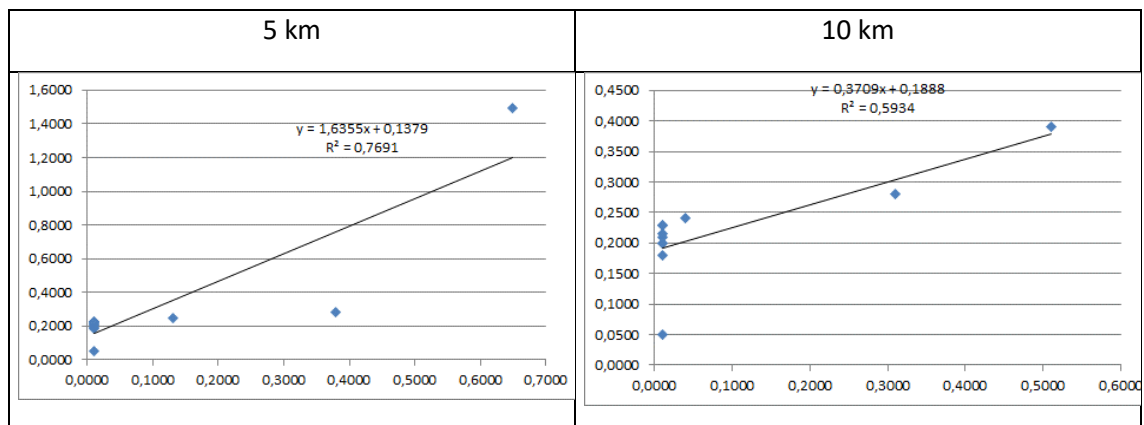


Figura 5.1.6: Gráficos binarios donde es posible observar la correlación entre los resultados obtenidos para el antimonio (Sb) en las bandas con espesor de 5 km y 10 km para análisis en los laboratorios Acme y SGSGeosol. En el eje X están los datos obtenidos de Acme; en el eje Y se encuentran los datos obtenidos del SGSGeosol.

Los resultados de la nivelación aplicada en la región Borborema – Seridó para los datos de aluminio (Al) se presentan en la Figura 5.1.7. La metodología de nivelación tuvo un efecto importante, ya que se observó que las regiones con mayores valores de Al son coincidentes con metasedimentos aluminosos, que contrastan con la composición de rocas graníticas más pobres en este elemento.

Como señala Grunsky (2010), trabajar con nivelación de datos geoquímicos dentro de un entorno GIS (ArcGIS, GEOSOFT Target, etc.) asociado a programas de tratamiento estadístico puede incrementar significativamente los resultados obtenidos y esta combinación de herramientas es importante y recomendable.

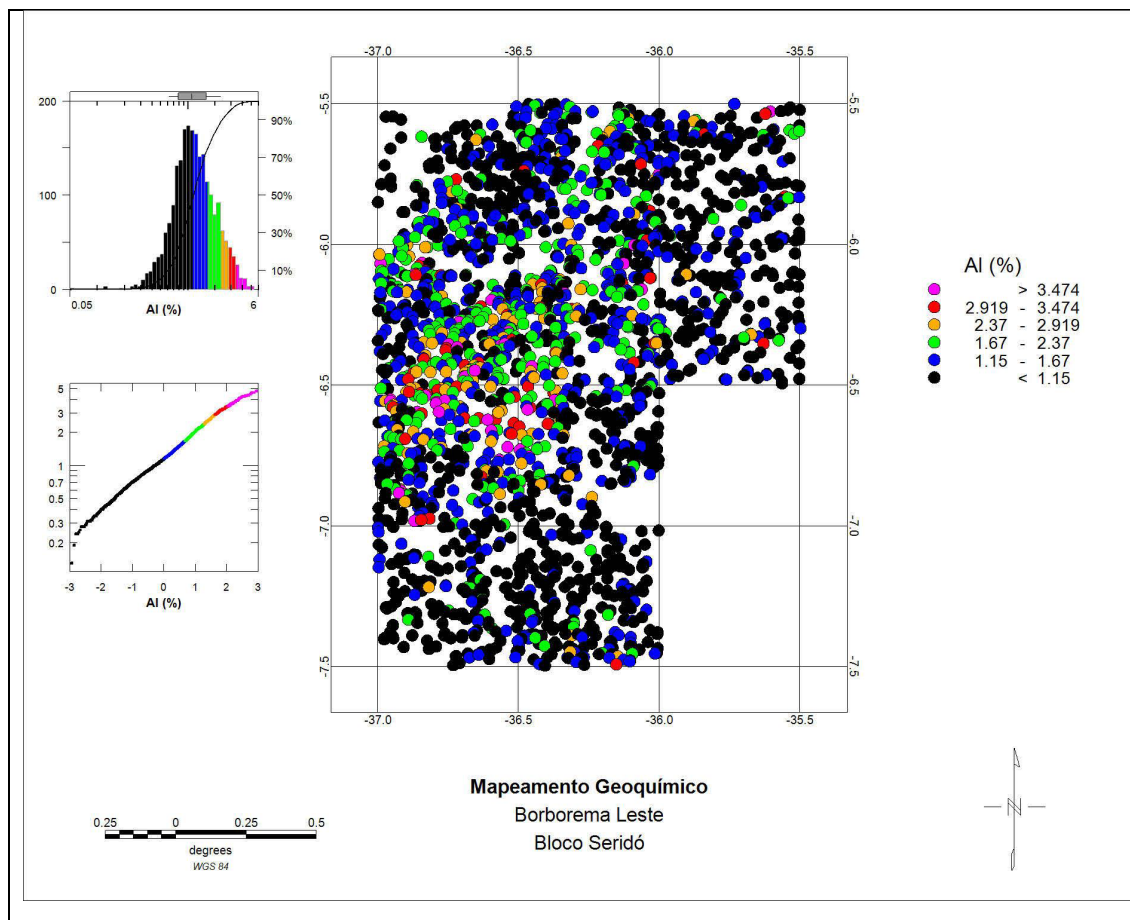


Figura 5.1.7. Los resultados de la nivelación aplicada en la región Borborema – Seridó para los datos de aluminio (Al)

Otro ejemplo de *Leveling* a través del método desarrollado por Daneshfar and Cameron (1998), se llevó a cabo sobre muestras de sedimento de corriente de distintas Cartas Geoquímicas 1:250.000 del Noroeste Argentino (NOA); se basa en hallar los parámetros de una ecuación de regresión que permita ajustar los datos de Pb de la Carta San Antonio de los Cobres (SAC) con el objeto de reducir o eliminar el “salto en los valores” visualizado en los límites con las Cartas contiguas, bien evidente al sur, con la Carta Cachi (Fig. 2 contenida en la Fig. 5.1.8) y atribuido principalmente a imperfecciones en la calibración de los métodos analíticos (Turel y de la Vega, 2011)

Para ello: a) se definieron cuatro áreas o bandas exploratorias B1, B2, B3 y B4 a ambos lados del límite (Figs. 1 y 2 contenidas en la Fig. 5.1.8); el incremento de las superficies y por tanto del número de muestras mejora la estimación estadística de los cuantiles que serán calculados para cada banda, pero a su vez aumenta la variabilidad litológica a ambos lados del límite; b) para cada banda, se subdividieron las bases de datos correspondientes a cada Carta, de manera que por ejemplo la “B1a” se integra por las muestras de la B1 de SAC mientras que las muestras de la “B1b” se corresponden con la B1 de la Carta Cachi; c) se estimó el parámetro “D” con los datos de Pb de cada banda, estimador que permite seleccionar la que exprese la menor variabilidad entre pares de cuantiles “a” y “b”; d) en un gráfico X-Y (Gráfico 1) se plotearon los once pares de cuantiles (0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 y 0,95) y e) del gráfico de la banda 2, cuya recta de *leveling* es considerada la que mejor ajusta a la distribución de pares de cuantiles, se obtuvieron los parámetros de la ecuación de regresión:

$$Pb_{lev} SAC = 0,8563 + 0,5232x \quad \text{donde } x = Pb_{orig} SAC$$

En base a esta ecuación se ajustaron los resultados de Pb de las 374 muestras de la Carta San Antonio de los Cobres; en la Figura 3 se visualiza la continuidad de la distribución de los valores de Pb tanto hacia el sur (Carta Cachi) como hacia el norte, en la Carta Susques.

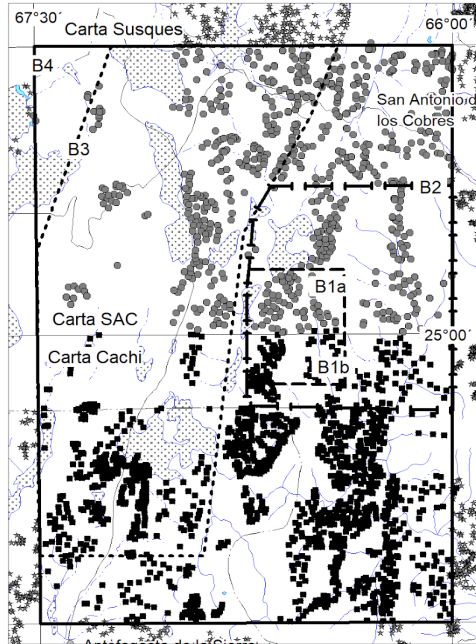


Figura 1. Ubicación de muestras de las Cartas SAC (●) y Cachi (■). Ubicación de bandas B1, B2, B3 y B4

Límite de Cartas Geoquímicas SAC - Cachi.

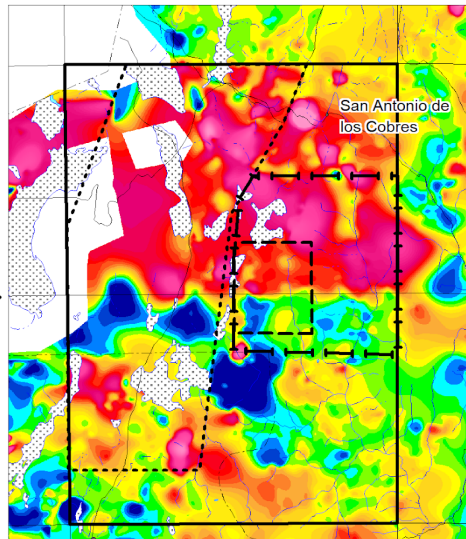


Figura 2. Distribución de Pb. Se observa un "salto" en los valores entre las Cartas SAC y Cachi

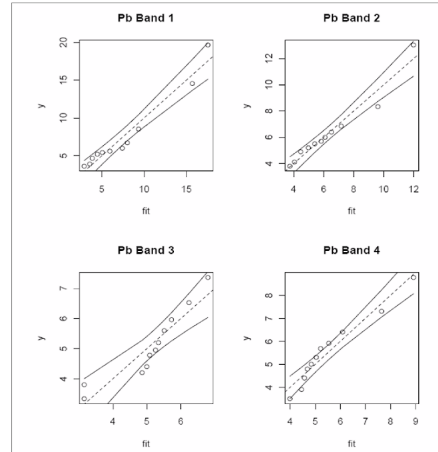


Gráfico 1. Gráfico de bandas. Pares de cuantiles, límites de confianza (95%) y recta x=y (punteada)

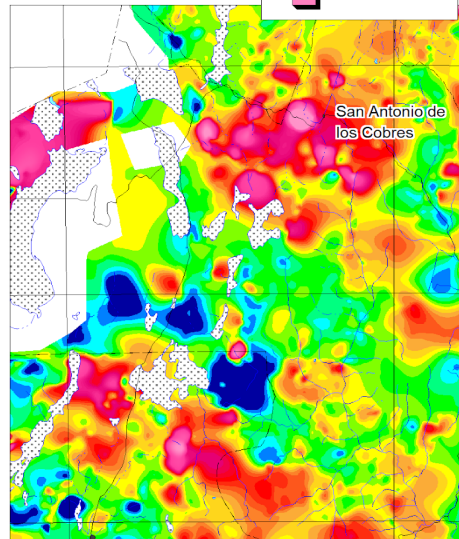
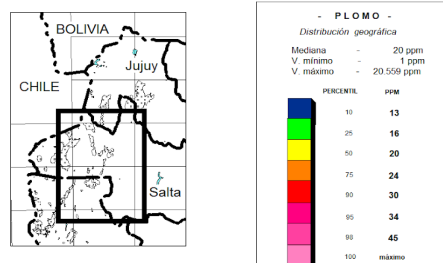


Figura 3. Distribución de Pb después del "leveling"

Figura 5.1.8. - Ejemplo de *Leveling* en muestras de sedimento de corriente de distintas Cartas Geoquímicas 1:250.000 del Noroeste Argentino (NOA) referidas como Fig. 1, 2 y 3

Algunas de las diferencias más sutiles entre subconjuntos de datos serán sin duda el resultado de la variación del fondo geoquímico natural y el proceso de nivelación tenderá a atenuar o incluso eliminar dichas diferencias. Esta es una limitación inevitable de la nivelación de datos geoquímicos que puede afectar negativamente el mapeo geoquímico a escala regional. Sin embargo, las respuestas geoquímicas asociadas con la mineralización no suelen tener una afectación tan sustancial, ya que la mineralización es una ocurrencia geológica rara y generalmente aislada espacialmente y es poco probable que influya en los niveles de fondo geoquímico en grandes áreas (Agnew et al., 2004).

Otra metodología de nivelación de datos geoquímicos consiste en el procesamiento de datos geodésicos es la normalización (o nivelación) del conjunto de datos geoquímicos regionales de acuerdo con los valores de referencia de los cinco puntos aleatorios, como se define dentro de cada celda de cuadrícula de 160x160 km de la Red Terrestre Global (GTN) utilizada para el muestreo global (Salahoris, 2022). El concepto básico detrás del método es que los 5 puntos aleatorios en la celda de la cuadrícula GTN tienen una densidad tal que forman un campo comparativamente uniforme, sin extremos locales dentro del área definida por los tres puntos GTN vecinos y, por lo tanto, puede ser aproximado como un plano.

La triangulación de Delaunay se utiliza en modelos digitales de terreno para generar una estructura de datos TIN (Okabe et al., 2000) para nivelar las mediciones topográficas. Este es el método que Salahoris (2022) utilizó para la nivelación geodésica de conjuntos de datos geoquímicos regionales utilizando los valores de referencia de puntos aleatorios GTN. El método consta de los siguientes pasos: 1. Definir la red irregular de triangulación a partir de los puntos que cubren el área de estudio para definir planos inclinados. Esta es la red de 5 puntos aleatorios dentro de cada celda de cuadrícula GTN de 160x160 km. 2. Calcular la distancia vertical de cada punto de datos geoquímicos regionales al plano de triangulación definido por los 5 puntos aleatorios en cada celda de cuadrícula de 160x160 km para estimar el valor de concentración elemental normalizado de cada punto de datos.

Para ejemplificar in el ArcMap defina un sistema de coordenadas cartesianas del marco de datos. Esto se recomienda para hacer cumplir efectivamente la regla de triangulación de Delaunay durante el siguiente paso (<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/create-tin.htm>) b. Cree un TIN usando los puntos de muestra de referencia GTN con las concentraciones de del elemento que se pretende nivelar, como valores de elevación. En ArcMap: Desde cajas de herramientas, 3D Analyst, Create Tin. Visualice los triángulos TIN. En nuestro caso usando la herramienta de comando "TIN Edge" (<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/tin-edge.htm>). Tenga en cuenta que los triángulos se extienden más allá de las dos celdas de la cuadrícula. Agregue las clases de entidad con los puntos de observación. Calcule la distancia vertical de cada punto de observación desde el plano de TIN correspondiente. En nuestro caso, utilice la "Herramienta Agregar Información de Superficie" con método Lineal, en el campo Z. Cree un nuevo campo y calcule la diferencia entre los valores medidos y los valores calculados (campo Z). Durante el procedimiento "Crear TIN", el algoritmo conecta puntos adyacentes para formular los triángulos, utilizando el método de triangulación de Delaunay. Los puntos adyacentes que se conectan, los resultados y los triángulos de Delaunay que se crean dependen del número de puntos de datos y su distribución espacial. En nuestro ejemplo de Finlandia, hemos utilizado todos los puntos de datos disponibles. Los triángulos podrían ser diferentes si pudiéramos usar puntos que se distribuyen uniformemente alrededor de las celdas de cuadrícula. Así, los valores normalizados de las observaciones dependen de cómo se formen los triángulos de Delaunay según la distribución espacial de los 5 puntos GTN de muestra aleatoria de referencia. Por tanto, es necesario estudiar la sensibilidad de los resultados nivelados con respecto a los cambios en la definición de los triángulos de Delaunay. Esta recomendación se explica en la Figura A2.1.4. Es obvio que se crean diferentes triángulos Dalaunay de referencia exterior y, en consecuencia, son posibles diferentes valores de nivelación.

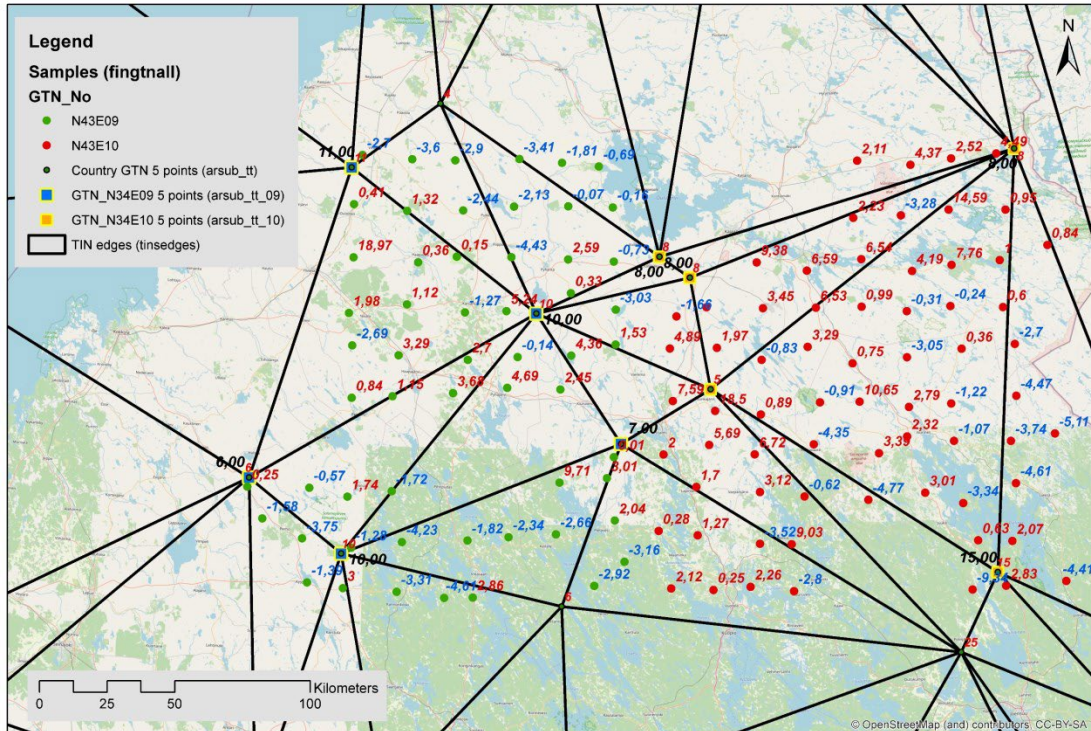


Figura 5.1.9 - Ejemplo de Leveling en muestras de suelos subsuperficiales en Filandia e los 5 puntos aleatórios de las celdas GTN

Finalmente, cabe señalar que el proceso de *leveling* tiene unas pautas, pero no hay un procedimiento transversal para aplicarlo a todas las variables. En este sentido, cada situación es un caso específico que normalmente requiere un ejercicio de ensayo y error. Además, como se mencionó anteriormente, se requiere un amplio conocimiento del origen de los datos y de las diversas metodologías analíticas para examinar las variables que puedan incidir en un efecto de *batch* y de esta manera seleccionar adecuadamente el método de *leveling* más indicado. En general, el proceso de *leveling* debe iniciarse aplicando las metodologías más sencillas, las cuales ofrecen buen desempeño en la mayoría de los casos, para luego probar otras más sofisticadas. Esto permite una menor intervención del *dataset* original. En este sentido, es muy importante garantizar la trazabilidad y el detalle de todos los cambios realizados a los datos, así como asegurar la integridad de los datos originales para posteriores re-tratamientos.

5.2 Estadística Univariada

Se basa en el análisis de poblaciones univariadas, con el objetivo de clasificar, presentar, describir, resumir y analizar los datos, donde los parámetros buscados son los estadísticos de posición, centralización, dispersión y forma (Gorgas et al., 2011). Un complemento gráfico es el análisis exploratorio (Ferrer et al., 1992) el cual tiene como objetivo identificar el modelo teórico más adecuado para representar la población de la cual proceden los datos. Dicho análisis se basa en gráficos y estadísticos que permiten explorar la distribución, identificando características tales como: valores atípicos u *outliers*, saltos o discontinuidades, concentraciones de valores, forma de la distribución, entre otros. Este análisis gráfico proporciona una base para el contexto y comparación de diferentes tipos de datos.

En situaciones donde una medida se realiza sobre cada ejemplar de una serie de ellos, pueden surgir otras distribuciones además de la normal. En resumen, es bastante común que los datos geoquímicos se ajusten

mejor a la denominada distribución log-normal. En esta distribución, la frecuencia representada frente al logaritmo de la concentración (u otra característica) proporciona una curva de distribución normal. Para describir y resumir las características de un conjunto de datos geoquímicos recurrimos a medidas estadísticas descriptivas; con el objetivo de describir ciertas posiciones importantes en la distribución y también el de conocer de qué manera se dispersan los valores dentro del rango, o bien la forma de la distribución de frecuencia; por eso se conocen respectivamente como medidas de posición, dispersión y de forma. Cuando estas medidas se refieren a la población las consideramos parámetros, mientras que si son estimadas a partir de una muestra las llamamos estadígrafos.

5.2.1 Medidas de tendencia central

Indican el valor promedio de los datos o del entorno en la cual se distribuyen. Los estadígrafos son la media aritmética, media geométrica, media armónica, media cuadrática, la moda y la mediana (Fig. 5.2.1).

Media aritmética (\bar{x})

Denominada simplemente media, es el valor numérico que se obtiene dividiendo la suma total de valores observados de una variable entre el número de observaciones. La media aritmética al depender de todos los valores observados, es afectada o segada por valores extremos discordantes o atípicos (*outliers*). Esto tiene mayor importancia cuanto menor es la cantidad de datos que se procesan.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Media geométrica (Mg)

El logaritmo de esta medida corresponde al valor de la media aritmética de los logaritmos de los datos. A veces resulta conveniente aplicar ciertas transformaciones a los datos para llevarlos a un mejor ajuste con ciertos modelos definidos. Por ejemplo, cuando los datos presentan una asimetría positiva marcada, si estos se transforman aplicando logaritmos, la distribución de los datos log-transformados presentará simetría o una asimetría mucho menor. Para caracterizar los datos de este caso en vez de usar la media aritmética, resulta conveniente emplear la media geométrica (Mg), cuyo valor será más cercano a la mediana (Md), siendo:

$$Mg = \sqrt[N]{x_1 x_2 x_3 \dots x_N}$$

Es evidente que el logaritmo de Mg es la media aritmética de los datos log-transformados:

$$\log \log (Mg) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log \log x_i$$

Media armónica (Mh)

La media armónica de un conjunto de datos es el inverso de la media aritmética de los inversos de los datos. Cuando el valor de la media está muy desplazado a la derecha de la Md puede ser conveniente emplear la media armónica (Mh).

De n valores no nulos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ son números reales, \underline{x}_A se define como el recíproco de la media aritmética de los recíprocos de los n valores.

$$Mh = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{x_i}}$$

Media cuadrática (x_Q)

Está definida como la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los datos. Es muy útil para calcular la media de variables que toman valores negativos y positivos. Se suele utilizar cuando el signo de la variable no es importante y lo que interesa es el valor absoluto del dato. Por ejemplo, para calcular la media de errores de medida.

$$\underline{x}_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N}}$$

Esta media se utiliza con frecuencia en el estudio de fenómenos físicos. Asimismo, este promedio o media se deja influenciar por valores extremos.

$$\text{La relación entre las medias es: } \underline{Mh} \leq \underline{Mg} \leq \underline{x} \leq \underline{x}_Q$$

Mediana (Md)

Es el número que separa a la serie de datos ordenados (de forma decreciente o creciente) en dos partes de igual número de datos. La mediana es el percentil 50 de los datos observados.

La mediana con datos ordenados $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_n$:

$$M_e = \left\{ \begin{array}{l} x_{\frac{n+1}{2}} \quad n \text{ es impar} \\ \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n+2}{2}}}{2} \quad n \text{ es par} \end{array} \right.$$

En el caso de que la cantidad de datos sea un número impar, la mediana se obtiene ubicando el valor que está en el centro. En el caso de que la cantidad de datos sea un número par, la mediana se obtiene como el promedio de los dos valores centrales.

Esta medida tiene la ventaja de ser menos sensible a la presencia de valores anómalos, respecto al promedio aritmético, ya que solo tiene en cuenta el orden de los datos y no su magnitud. Es decir, no se altera mayormente si un valor tiene un error grande de medida o de transcripción. Al comparar el valor de la mediana con el promedio aritmético, si hay mucha diferencia entre ellas, esto es señal que la distribución de los datos es asimétrica. La mediana se puede determinar gráficamente utilizando el diagrama de frecuencia acumulada $F(x)$.

Moda (M_o)

Se conoce también como promedio industrial, está representado por el valor o cantidad que más se repite o tiene una mayor frecuencia de aparición. En variables continuas, lo mejor es determinar esta medida de tendencia central, a partir de la tabla de distribución de frecuencias de la variable. En la tabla de frecuencias con escala de intervalos, debemos ubicar el intervalo de mayor frecuencia absoluta. A este intervalo se le denomina intervalo modal. La moda suele utilizarse como promedio cuando alguno de los datos se destaque claramente sobre los demás, esto es, que su frecuencia absoluta sea considerablemente mayor que todas las demás.

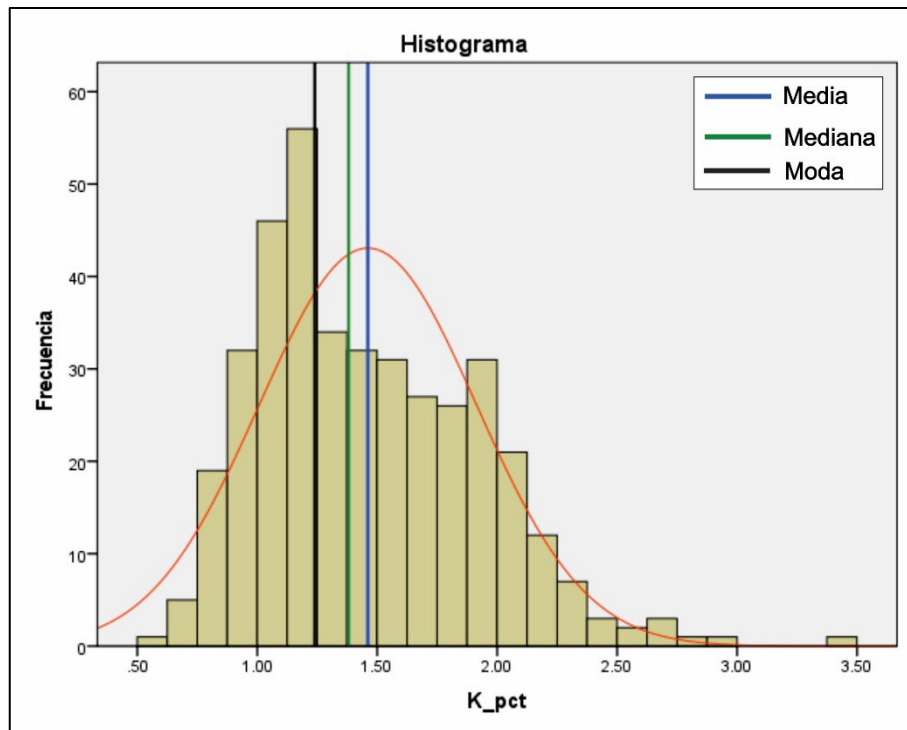


Figura 5.2.1 Distribución estadística y medidas de tendencia central de potasio en suelos superficiales provenientes del dominio parental de rocas metamórficas del Neoproterozoico Devoniano en el valle del río Mantaro, centro del Perú.

5.2.2 Medidas de posición

Estos estadígrafos dividen los datos en proporciones específicas, entre los que se tienen a la mediana y los cuantiles.

Los cuantiles son medidas de localización, su función es informar el valor de la variable que ocupará la posición (en tanto por ciento) que nos interese, respecto de todo el conjunto de datos.

Los más importantes son: cuartiles, dividen a la distribución en cuatro partes iguales (tres divisiones) Q1, Q2 y Q3, correspondientes a 25%, 50% y 75%, respectivamente. Deciles dividen a la distribución en 10 partes iguales (9 divisiones) D1,..., D8 y D9, correspondientes a 10%, ..., 80% y 90%, respectivamente. Percentiles, cuando dividen a la distribución en 100 partes iguales (99 divisiones) P1,..., P98 y P99, correspondientes a 1%, ..., 98% y 99%, respectivamente.

Cuartiles

Son los tres valores que dividen al conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales. Hay tres cuartiles denotados usualmente Q1, Q2, Q3: el primer cuartil (Q1), es aquel valor de la variable que supera el 25% de las observaciones y es superado por el 75% restante. El segundo cuartil (Q2) coincide con la mediana (Md). El tercer cuartil (Q3), es el valor de la variable que supera al 75% de los datos y es superado por el 25% de las observaciones restantes.

Deciles

Corresponden a nueve valores que dividen la sucesión de datos ordenados en diez partes porcentualmente iguales. Son un caso particular de los percentiles, ya que podemos definir al decil como un percentil cuyo valor indica que su proporción es un múltiplo de diez. Por ejemplo: el percentil 10 es el primer decil, el percentil 20 el segundo decil y así sucesivamente. El primer decil (D1) indica que sólo existe 10% de probabilidad de que el valor de la variable sea menor a dicho decil. El quinto decil (D5) es denominado también “caso base”, ya que indica que existe 50% de probabilidad de que el valor esté por encima como por debajo del quinto decil. Representa la mediana de la distribución.

Percentiles o centiles

Dividen a la sucesión de datos ordenados en cien partes porcentualmente iguales. Un percentil es el valor del recorrido de una variable, bajo el cual se encuentra una proporción determinada de la distribución. Por ejemplo, el percentil 10 indica que el 10% de los valores de la variable está por debajo de dicho valor y el 90% de los datos restantes es superior al valor del percentil 10.

$$P_k = L_i + \frac{1}{f_i} \left(\frac{kN}{100} - f_a \right)$$

Donde:

k: Porcentaje de casos del centil.

L_i : Límite inferior de la puntuación donde se encuentra el centil.

f_i : Frecuencia de la puntuación donde se encuentra el centil.

N: Tamaño de grupo.

f_a : Frecuencia acumulada hasta el límite inferior de la puntuación donde se encuentra el centil.

Puntaje estandarizado (Z_i)

La variable Z_i o puntaje estandarizado mide la posición relativa del valor de la variable con respecto al promedio aritmético (\bar{x}), expresado en unidades de desviación estándar. Esta variable es adimensional, por lo que resulta muy interesante su utilización cuando se desea comparar una observación en diferentes variables. Asimismo, para comparar resultados de experimentos expresados en ciertas unidades, con otros expresados en unidades diferentes. La fórmula estandarizada es: $z = (x - m) / s$, donde: z es el puntaje estándar.

5.2.3 Medidas de dispersión

Los estadísticos de tendencia central reducen los valores a uno solo y este será más o menos representativo de la muestra, dependiendo de la dispersión que las medidas individuales tengan respecto a ese centro. Para el análisis de representatividad de los estadísticos de tendencia central, se definen los estadísticos de dispersión, que indican la variabilidad de los datos en torno a su valor promedio, es decir su grado de dispersión. Se pueden definir entonces, diversas medidas de desviación o dispersión, siendo estas fundamentales para la descripción estadística de la muestra. Los estadígrafos de dispersión más comunes son: desviación estándar, varianza y coeficiente de variación.

Desviación estándar (σ)

Es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Tiene una gran importancia y es la cuantificación de la precisión de las mediciones de una determinada variable.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Se utiliza, entre otras aplicaciones, para construir intervalos de confianza que contendrán los límites extremos (mínimos y máximos), entre los cuales oscilará un parámetro de una población de estudio. Si la curva que representa a un conjunto de datos tuviese la forma de una campana de Gauss, estamos seguros que aproximadamente el 95% de los datos pertenece al intervalo definido por $\bar{x} \pm 2\sigma$.

Por otro lado, es importante indicar que la desviación estándar influye directamente en el recorrido de una distribución estadística, lo cual se observa claramente en las curvas de distribución (Figura 5.2.2.).

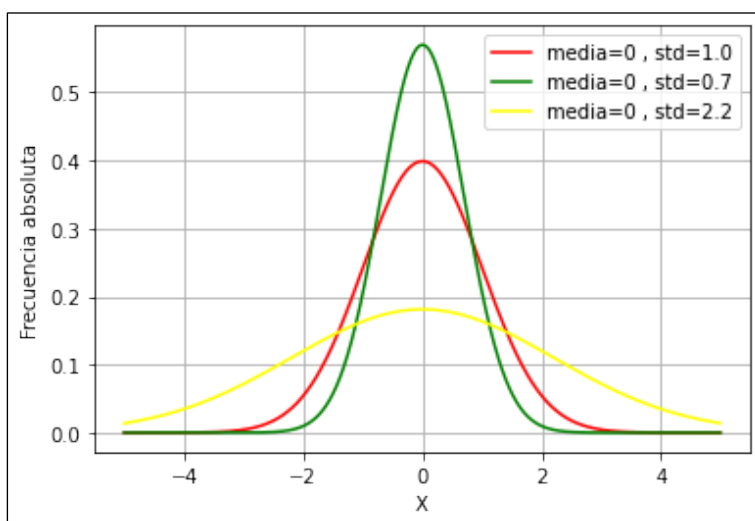


Figura 5.2.2. Distribuciones estadísticas y desviación estándar. Elaboración propia, SG de Perú

Varianza (σ^2)

Está definida como la media aritmética de los cuadrados de las diferencias de los valores con respecto a su media aritmética. Mide la distancia existente entre los valores de la distribución y la media.

Sirve para cuantificar el nivel de dispersión o variabilidad de los valores de una variable cuantitativa con respecto a su media aritmética. La varianza presenta unidades cuadráticas. Mientras más se aproxima a cero, más concentrados están los valores de la distribución alrededor de la media. Por el contrario, mientras mayor sea la varianza, más dispersos están.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

Coficiente de variación (CV)

Es una medida de dispersión relativa que se define como el cociente de la desviación estándar entre la media aritmética. Tiene la propiedad de ser adimensional. No obstante, puede expresarse en tanto por

ciento. Por lo tanto, sirve para comparar el menor o mayor grado de homogeneidad de una variable respecto de otra.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%$$

Una de las características intrínsecas de las variables estadísticas es su grado de dispersión o variabilidad. Un ejemplo de variable estadística puede ser la abundancia geoquímica de un determinado elemento traza, cuya variabilidad estadística dependerá principalmente del carácter geoquímico, la matriz de muestreo y los patrones de dispersión geoquímica. Generalmente, la variabilidad estadística es medida mediante el rango, desviación estándar o varianza. No obstante, también se puede expresar en base al coeficiente de variación, el cual ofrece información relevante sobre la magnitud de la dispersión estadística y la medida de tendencia central aplicada. Mientras más cercano a cero es el CV, mayor grado de homogeneidad denotará la variable estudiada.

5.2.4 Medidas de forma

Los estadísticos de forma estudian el grado de simetría de los datos respecto a su medida central y concentración alrededor de esta. Para caracterizar el comportamiento de una muestra o variable en base a la forma de su distribución, se emplea el coeficiente de asimetría o sesgo y el coeficiente de curtosis.

Coeficiente de asimetría o coeficiente de sesgo

Cuantifica el grado de asimetría de una distribución. Cuando este valor es cero, sugiere que los datos están simétricamente distribuidos en torno a una medida de tendencia central, que generalmente es el promedio aritmético o la mediana. Valores positivos para el sesgo, indican que la distribución presenta una cola más pronunciada hacia la derecha, debido a valores anómalamente altos. Por el contrario, valores negativos indican una cola más pronunciada hacia el lado izquierdo, a causa de valores anómalamente bajos (Maluenda, 2014).

Se dice que una distribución es simétrica cuando los valores equidistantes del valor central tienen las mismas frecuencias. El caso de distribución simétrica perfecta es cuando la media aritmética, mediana y moda coinciden. En caso de no ser simétrica, se dirá que la distribución es asimétrica a la derecha o positiva, o caso contrario será asimétrica a la izquierda o negativa (Figura 5.2.3).

Para calcular el coeficiente de asimetría se emplea el coeficiente de Fisher (g_3) o el coeficiente de Pearson (A_p).

$$g_3 = \frac{m_3}{\sigma^3}$$

$$A_p = \frac{\bar{x} - M_o}{\sigma}$$

Siendo:

$$m_3 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3 n_i}{N}$$

σ = Desviación estándar.

x_i = Valor i de la distribución.

\bar{x} = Media aritmética.

M_0 = Moda.

n_i = Frecuencia absoluta de x_i .

N = Número de valores de la distribución.

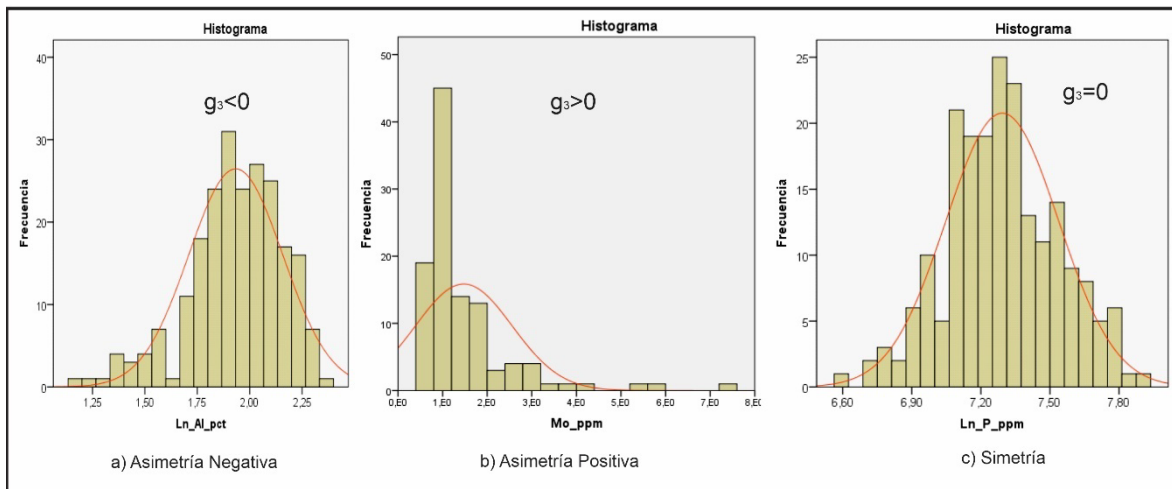


Figura 5.2.3 Tipos de distribución según su forma en suelos superficiales del valle del río Mantaro, centro del Perú, elaboración propia.

Coefficiente de curtosis (g_2)

Es una propiedad de la distribución de frecuencias por la cual se compara la dispersión de los datos cercanos al valor central con la dispersión de los datos cercanos a ambos extremos de la distribución. Mide el grado de achatamiento o alargamiento de la curva generada por los datos a partir de su histograma, respecto al modelo teórico de Karl F. Gauss o curva de distribución normal (Figura 5.4).

$$g_2 = \frac{m_4}{\sigma^4}$$

Siendo:

$$m_4 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4 n_i}{N}$$

σ = Desviación estándar.

x_i = Valor i de la distribución.

\bar{x} = Media aritmética.

n_i = Frecuencia absoluta de x_i .

N = Número de valores de la distribución.

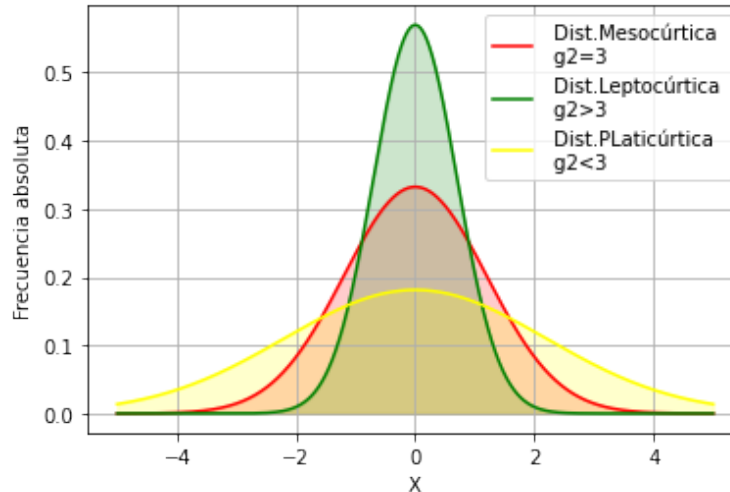


Figura 5.2.4 Tipos de distribución según la curtosis, elaboración propia

Mientras más alargada o aflautada es la curva, se dice que es leptocúrtica ($g_2 > 3$).

Mientras más aplastada o achatada es la curva, se dice que es platicúrtica ($g_2 < 3$).

5.2.5 Gráficos estadísticos

Una de las maneras óptimas de presentar la información estadística es mediante gráficos. Es conocido que el análisis de los datos tabulados, resulta muchas veces complejo y tedioso, debido a las múltiples comparaciones que se tienen que hacer con los datos y el escaso tiempo que a veces se dispone para ello. Es así que, los gráficos estadísticos resultan importantes para explicar escenarios o tablas con información resumida, puesto que permiten:

- Tener una visión global y condensada del comportamiento de las variables.
- Observar posibles tendencias.
- Apreciar su campo de variación.

Un gráfico deber ser sencillo y auto explicativo, además de contar con escalas adecuadas en los ejes de coordenadas, a fin de evitar distorsiones e interpretaciones erróneas.

Histograma

Es uno de los gráficos más usados para mostrar la distribución de los datos, permite comprender objetivamente el comportamiento de una variable. Los patrones inusuales o sospechosos pueden indicar que un proceso debe ser investigado. Así mismo, con un intervalo de clase muy pequeño se puede observar la curva de densidad, la cual es muy útil para la estimación (Figuras 5.5).

Para construir un histograma, se han establecido una serie de procedimientos. Por ejemplo, si la naturaleza de la distribución es normal o cercana a esta, se puede aplicar la regla de Sturges que establece que el número de intervalos o clases es igual a $1 + \log_2(N)$, donde "N" es el número de observaciones. La regla de Sturges no se adecua a las distribuciones que no son normales. Es importante acotar que, si el número de intervalos es demasiado pequeño, entonces se suavizan los detalles más finos de la distribución, mientras que, si el número de intervalos es demasiado grande, la distribución parece discontinua.

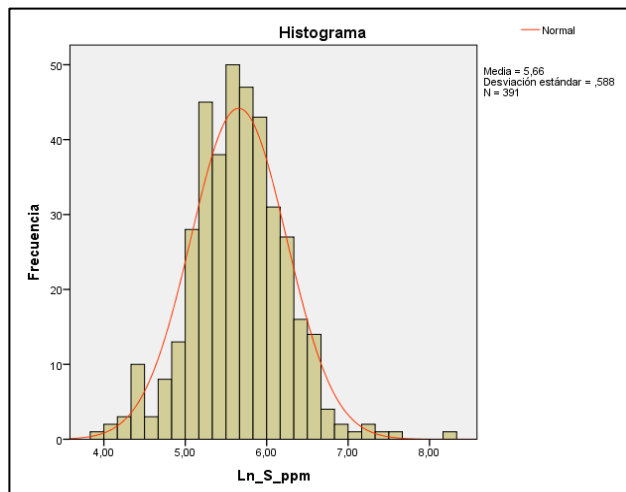


Figura 5.2.5. Histograma de los logaritmos de la distribución de azufre en suelos superficiales del valle del río Mantaro, centro del Perú, elaboración propia.

Gráfico de cajas y bigotes

Es utilizado para mostrar la estadística de orden en forma gráfica (Turkey 1977). La principal ventaja del diagrama de cajas y bigotes a diferencia del histograma, es que su forma no depende de la elección del intervalo o clase. Siempre que, la escala de presentación gráfica sea razonable. Este gráfico proporciona una estimación visual y rápida de la distribución de frecuencias.

El gráfico de cajas y bigotes representa los tres cuartiles, el valor mínimo y valor máximo de los datos sobre un rectángulo alineado (horizontal o vertical). El rectángulo (caja) delimita el rango intercuartílico con la arista izquierda (o inferior) ubicada en el primer cuartil (Q1), y con la arista derecha (o superior) situada en el tercer cuartil (Q3). La línea al interior del rectángulo corresponde al segundo cuartil (mediana). A partir de cualquiera de las aristas del rectángulo se extiende una línea, o bigote, que va hacia los valores extremos. Estas son observaciones que se encuentran entre cero y 1.5 veces el rango intercuartílico a partir de las aristas del rectángulo. Las observaciones que están entre 1.5 y 3 veces el rango intercuartílico, a partir de las aristas del rectángulo, reciben el nombre de valores atípicos (outliers). Las observaciones mayores a 3 veces el rango intercuartílico, a partir de las aristas del rectángulo, reciben el nombre de valores atípicos extremos. Para representarlos se suelen utilizar símbolos, tal como se observa en la Figura 5.6.

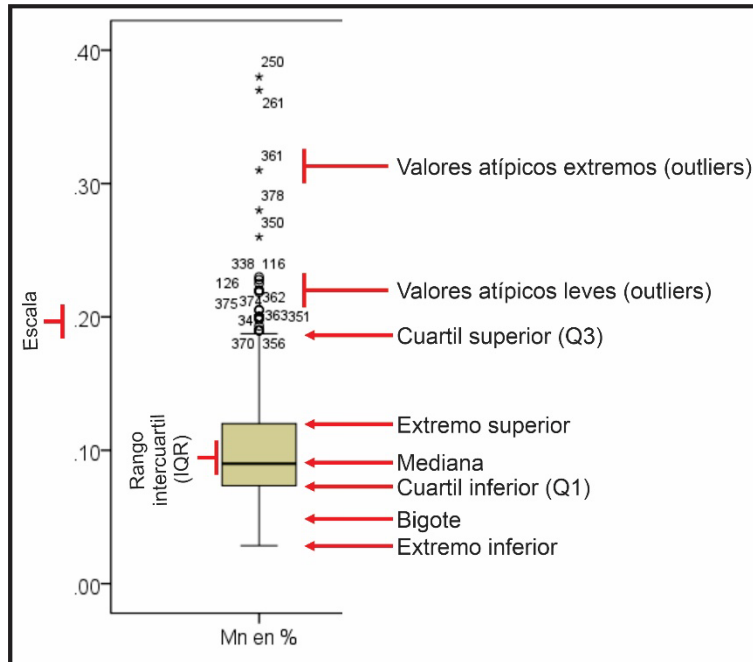


Figura. 5.2.6. Diagrama de cajas y bigotes de la distribución de manganeso en suelos superficiales del valle del río Mantaro, centro del Perú, elaboración propia.

Las longitudes de los bigotes a cada lado de la caja proporcionan una estimación de la simetría de la distribución. También se pueden agregar muescas al diagrama, que identifican el ancho de los límites de confianza sobre la mediana.

En la Figura 5.2.7 se muestran gráficos de cajas y bigotes de los logaritmos de las concentraciones de arsénico en sedimentos de corriente, según el dominio geológico regional, bajo el supuesto de población estadística.

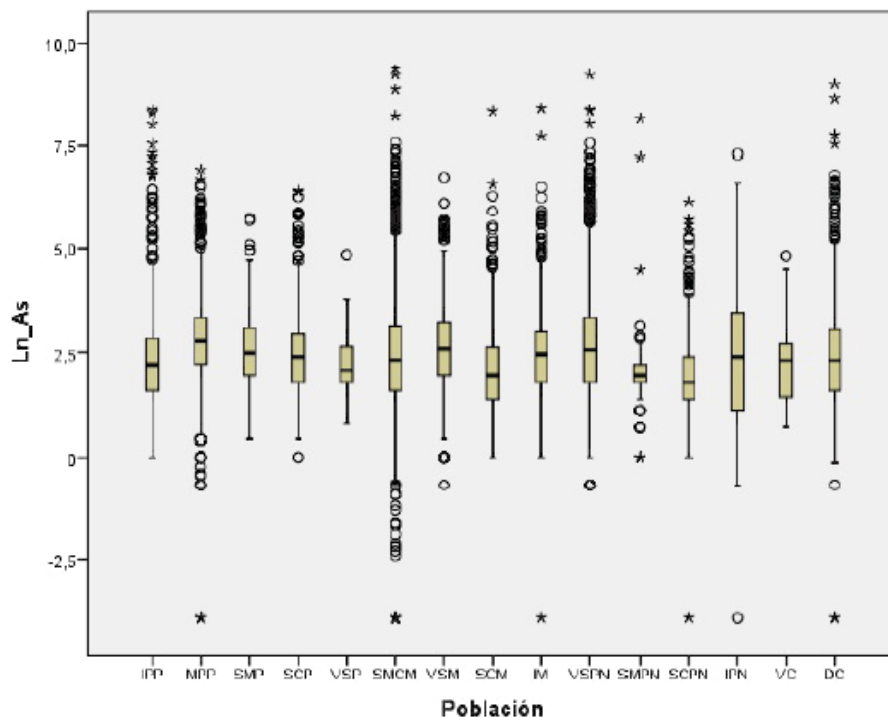


Figura 5.2.7. Gráfico de cajas y bigotes de arsénico en sedimentos de corriente según el dominio geológico regional. Tomado del Atlas Geoquímico del Perú (2017).

Ojiva o curva de distribución acumulada

Consiste en la representación de una curva cuyas ordenadas tienen tantas unidades como elementos existen en la distribución hasta el punto determinado. En el eje de las abscisas se ubican los intervalos y en el eje de las ordenadas, las frecuencias acumuladas.

La ojiva es un gráfico que permite obtener de manera muy aproximada el valor de cualquier percentil. Se debe trazar una línea perpendicular al eje vertical que pase por un porcentaje deseado y se prolongaría hasta que corte la curva de las frecuencias acumuladas. Desde aquí, bajar una perpendicular que corte el eje horizontal. Este punto representa el valor del percentil.

Gráfico de probabilidad Q-Q

Los gráficos cuantil-cuantil (Q-Q) permiten comparar una distribución de frecuencia con respecto a una distribución de frecuencia esperada, que suele ser la distribución normal. Son equivalentes a las gráficas de probabilidad normal que han sido ampliamente utilizadas por Sinclair (1976) para el análisis de datos geoquímicos.

Stanley y Sinclair (1987, 1989) y Stanley (1987) han escrito extensamente sobre el uso de gráficos de probabilidad para discriminar poblaciones.

Estos gráficos se generan calculando los valores de los cuantiles para la distribución de frecuencia normal (en el rango de probabilidad de 0 a 1) y luego graficando estos contra los datos observados y ordenados. Si una distribución de frecuencia se distribuye normalmente, entonces cuando los cuantiles se grafican contra los valores ordenados de la población, el gráfico será una línea recta. Si la distribución de frecuencia de la población es sesgada o la población es polimodal, el gráfico Q-Q será una curva o una traza

discontinua (Figura 5.8). La ventaja del gráfico Q-Q es que se representa cada observación individual y, por lo tanto, se pueden observar las características detalladas de los grupos de observaciones.

Los gráficos Q-Q también son útiles para identificar valores extremos en las colas de la distribución. La línea que atraviesa los datos representa la intersección en los percentiles 25 y 75 de los datos.

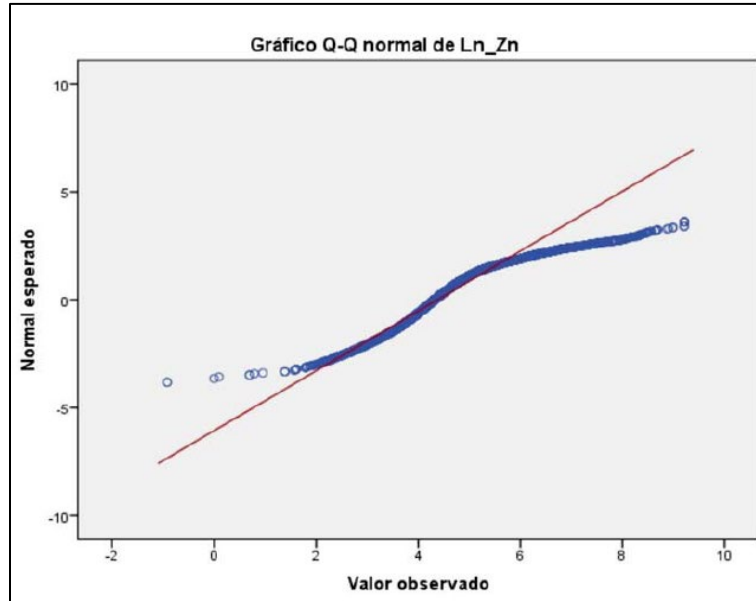


Figura 5.2.8. Gráfico Q-Q de los logaritmos de las concentraciones de zinc en sedimentos de corriente. Tomado del Atlas Geoquímico del Perú (2017).

Gráfico de frecuencia acumulada

Las curvas de frecuencia de una muestra de tamaño N , donde la variable estadística x toma los valores distintos x_1, x_2, \dots, x_k ; sirve para caracterizar dicha variable estadística, representando su frecuencia relativa acumulada hasta el punto x_k (Figura 5.9).

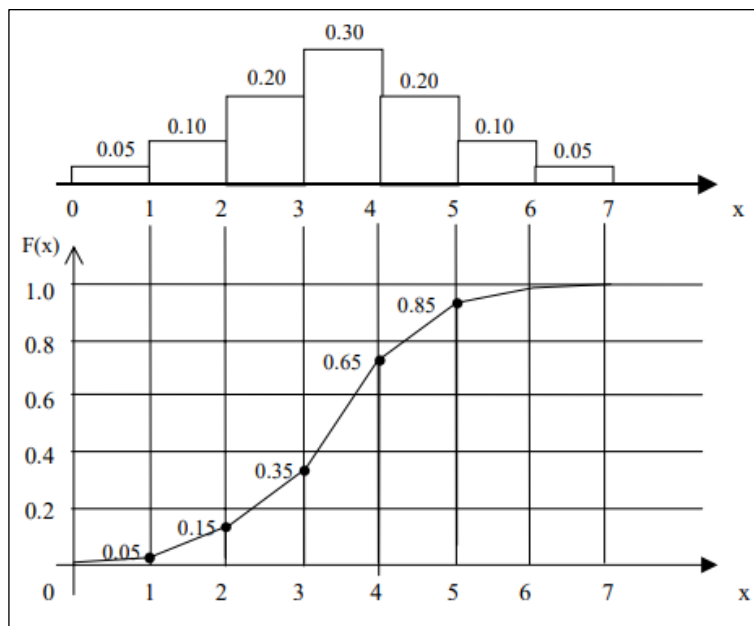


Figura 5.9 Frecuencia acumulada. Tomado de Alfaro (2000).

5.2.6. Tablas de resumen estadístico

Son descripciones útiles de los datos y suelen incluir los cuartiles, valor mínimo, valor máximo, media, mediana, primer y tercer cuartil. Así mismo, las medidas de dispersión como la desviación estándar, varianza y el coeficiente de variación. Este último es muy útil porque se puede utilizar como una medida relativa para comparar diferentes elementos químicos. En la Tabla 1 se resume la estadística descriptiva de un conjunto de elementos químicos en suelos superficiales.

Las tablas de resumen son ampliamente empleadas para mostrar la estadística descriptiva. Sin embargo, los gráficos como se describió anteriormente, permiten visualizar los principales rasgos de las distribuciones y las relaciones entre las observaciones. Es por esto que, se recomienda que los valores de una tabla de resumen se interpreten conjuntamente con los gráficos estadísticos.

Tabla 1. Resumen de los principales parámetros estadísticos de suelos superficiales en el centro del Perú.

Elemento	Unit	Num Obs	Min	1%	5%	10%	25%	Mediana (50%)	Media	75%	90%	95%	99%	Std. DEV.	MAD	CV
Au	ppm	391	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.97
Hg	ppb	391	5.00	5.00	30.00	44.20	64.00	89.40	226.06	160.00	382.00	689.60	3272.00	550.01	226.06	0.41
Ag	ppm	391	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.64	0.88	1.23	1.70	4.66	0.73	0.64	0.87
Al	pct	391	3.56	3.79	4.65	4.97	5.53	6.25	6.31	7.10	7.72	7.96	8.70	1.06	6.31	5.96
As	ppm	391	2.50	9.35	16.04	19.04	26.59	34.00	43.14	44.99	70.59	107.52	224.55	38.26	43.14	1.13
Ba	ppm	391	139.52	158.57	192.07	215.40	255.00	312.00	334.49	411.00	464.96	507.40	611.07	105.30	334.49	3.18
Bi	ppm	391	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.02	5.00	5.00	5.00	5.00	0.33	5.02	15.42
Ca	pct	391	0.03	0.11	0.18	0.26	0.47	1.46	2.91	4.20	8.28	10.22	14.55	3.39	2.91	0.86
Cd	ppm	391	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.93	0.50	2.00	3.33	7.84	1.29	0.93	0.72
Co	ppm	391	6.22	6.79	9.15	10.03	12.00	14.00	14.21	16.00	19.00	21.00	25.00	3.45	14.21	4.12
Cr	ppm	391	24.60	30.26	34.75	37.77	44.23	55.08	56.25	65.56	75.93	82.00	102.80	15.74	56.25	3.57
Cu	ppm	391	9.00	15.22	20.00	22.00	26.66	33.86	49.84	44.63	78.57	158.16	363.24	60.10	49.84	0.83
Fe	pct	391	1.95	1.98	2.50	2.67	3.02	3.36	3.45	3.77	4.40	4.85	5.38	0.68	3.45	5.06
K	pct	391	0.62	0.71	0.86	0.95	1.11	1.38	1.46	1.76	2.07	2.22	2.73	0.45	1.46	3.23
La	ppm	391	12.00	16.18	20.00	21.80	24.48	28.00	28.63	31.54	37.00	40.03	46.08	6.26	28.63	4.57
Li	ppm	391	16.19	20.76	26.95	30.00	34.99	41.56	43.45	50.00	59.00	67.68	79.26	12.38	43.45	3.51
Mg	pct	391	0.23	0.24	0.27	0.30	0.36	0.49	0.56	0.68	0.93	1.09	1.49	0.29	0.56	1.96
Mn	pct	391	0.03	0.03	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.12	0.17	0.20	0.28	0.05	0.10	2.20
Mo	ppm	391	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.44	3.12	4.00	5.58	7.08	22.08	3.84	3.12	0.81
Na	pct	391	0.05	0.05	0.08	0.09	0.14	0.27	0.35	0.53	0.72	0.87	1.20	0.27	0.35	1.32
Ni	ppm	391	14.20	15.00	18.00	19.43	21.92	25.74	28.37	32.83	38.00	46.00	72.33	10.91	28.37	2.60
P	pct	391	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.20	0.25	0.42	0.07	0.13	1.97
Pb	ppm	391	7.00	12.55	19.04	23.00	30.00	42.31	85.83	69.00	125.50	382.55	1119.14	158.40	85.83	0.54
Sb	ppm	391	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.54	9.31	3.79	11.39	54.80	160.07	28.26	9.31	0.33

Fuente: Boletín N° 76, serie B - INGEMMET (2022).

5.3 Estadística Bivariada

Las técnicas estadísticas bivalentes permiten el análisis conjunto de dos características (variables) de los individuos de una población, con el propósito de detectar posibles relaciones entre ellas. Asimismo, busca someter a contrastación la tesis de asociación y hasta causalidad entre dos variables definidas. En cualquier caso, el análisis bivariado se plantea con la intención de determinar el nivel de relación entre dos variables y la función estocástica que subyace a un conjunto de observaciones (x, y). Pues si bien la relación no es evidencia suficiente de causalidad no se puede hablar de causalidad en ausencia de relación entre las variables.

5.3.1 Diagramas de dispersión

Las observaciones se consideran como un par ordenado, que puede representarse como un punto en el sistema de coordenadas rectangulares, generando una nube de puntos en la cual se puede analizar la relación entre las variables (Figura 5.3.1).

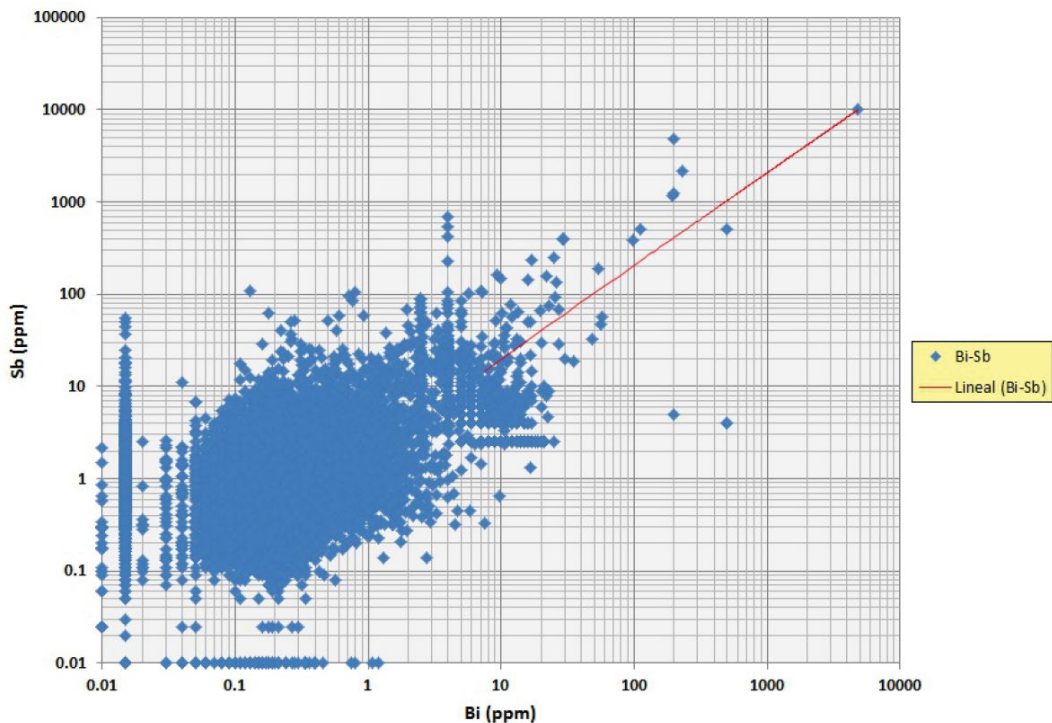


Figura 5.3.1. Nube de dispersión Bi-Sb. Tomado del Atlas Geoquímico del Perú (2017).

5.3.2 Covarianza (COV)

La covarianza es un valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias. Es el dato básico para determinar si existe una dependencia entre ambas variables y además es el dato necesario para estimar otros parámetros básicos, como el coeficiente de correlación lineal o la pendiente de la recta de regresión (Maluenda, 2014).

Es una medida de la asociación lineal entre dos variables que resume la información existente en un gráfico de dispersión (Figura 5.3.2). La unidad de la covarianza es (unidad de x)*(unidad de y). Por lo anterior, se prefiere usar una cantidad adimensional, que puede ser el coeficiente de correlación.

$$COV(X, Y) = S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N}$$

5.3.3 Regresión lineal

Es un método estadístico para la modelización e investigación de la relación entre dos o más variables. Permite hacer un resumen de los datos y cuantificar la naturaleza y fuerza de la relación entre una variable dependiente o respuesta (Y), y una o más variables independientes o predictivas (X). En síntesis, se trata de buscar un modelo estadístico que mejor interprete la relación entre las variables. Cuando se tiene una sola variable independiente (X), se denomina regresión simple. Cuando existe una variable predictora los modelos para ajustar los datos empíricos pueden ser:

Modelo lineal o regresión lineal: $Y = a + bX$

Modelos no lineales que pueden ser linealizados, por ejemplo: $Y = a * X^b$

Modelo polinómico, por ejemplo: $y = a + bx + cx^2$ $y = a + bx + cx^2 + dx^3$

El método matemático para ajustar modelos a un conjunto o muestras de datos empíricos, obtenidos de los procesos o de experimentos diseñados con ese propósito se denomina método de los mínimos cuadrados. Debemos establecer un criterio para tratar de minimizar las desviaciones de los puntos observados con los puntos del modelo ajustado, para un mismo valor de X. Es decir, establecer un criterio para el mejor ajuste intuitivamente razonable (objetivo), y que según ciertas condiciones ofrezca la mejor predicción de Y para un valor de X (Figura 5.3.2.).

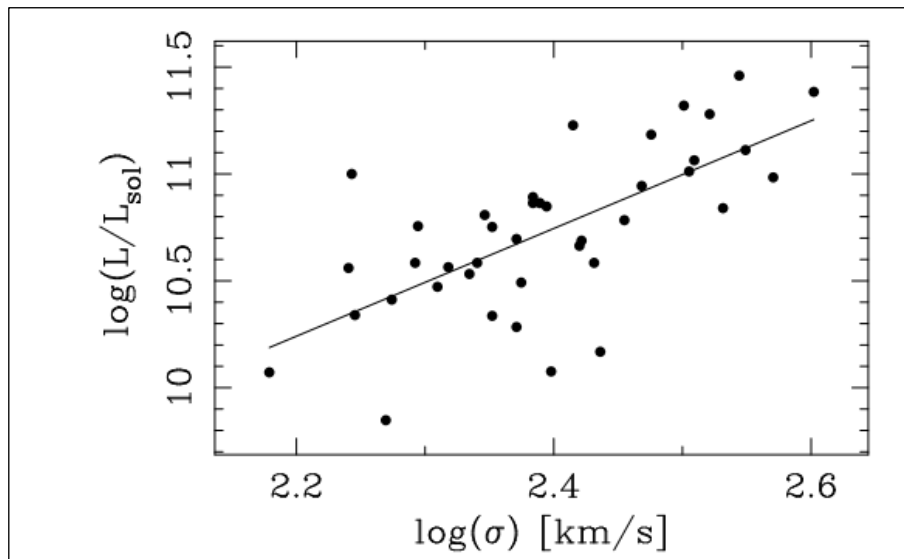


Figura 5.3.2. Recta de regresión lineal. Tomado de Gorgas *et al.* (2011).

5.3.4 Correlación de Pearson

Es un índice que mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables, es decir, es adimensional. El coeficiente de correlación o índice lineal de Pearson nos da información del grado o fuerza de correlación entre las variables (Figura 5.3.3.).

El propósito de este análisis es conocer el comportamiento de un indicador de la intensidad o la fuerza de la relación entre dos variables cuantitativas X e Y, que no dependa de sus respectivas escalas de medición. Existen varios indicadores de correlación, pero en todos los casos, se debe analizar el resultado numérico del coeficiente de correlación.

El coeficiente de los n pares de valores $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ de una variable bidimensional (X, Y) es el número abstracto o relativo "r" que se calcula por:

$$r = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Un valor positivo implica que la recta asciende de izquierda a derecha en el diagrama de dispersión; mientras que un valor negativo denota que la recta desciende de izquierda a derecha en el diagrama de dispersión.

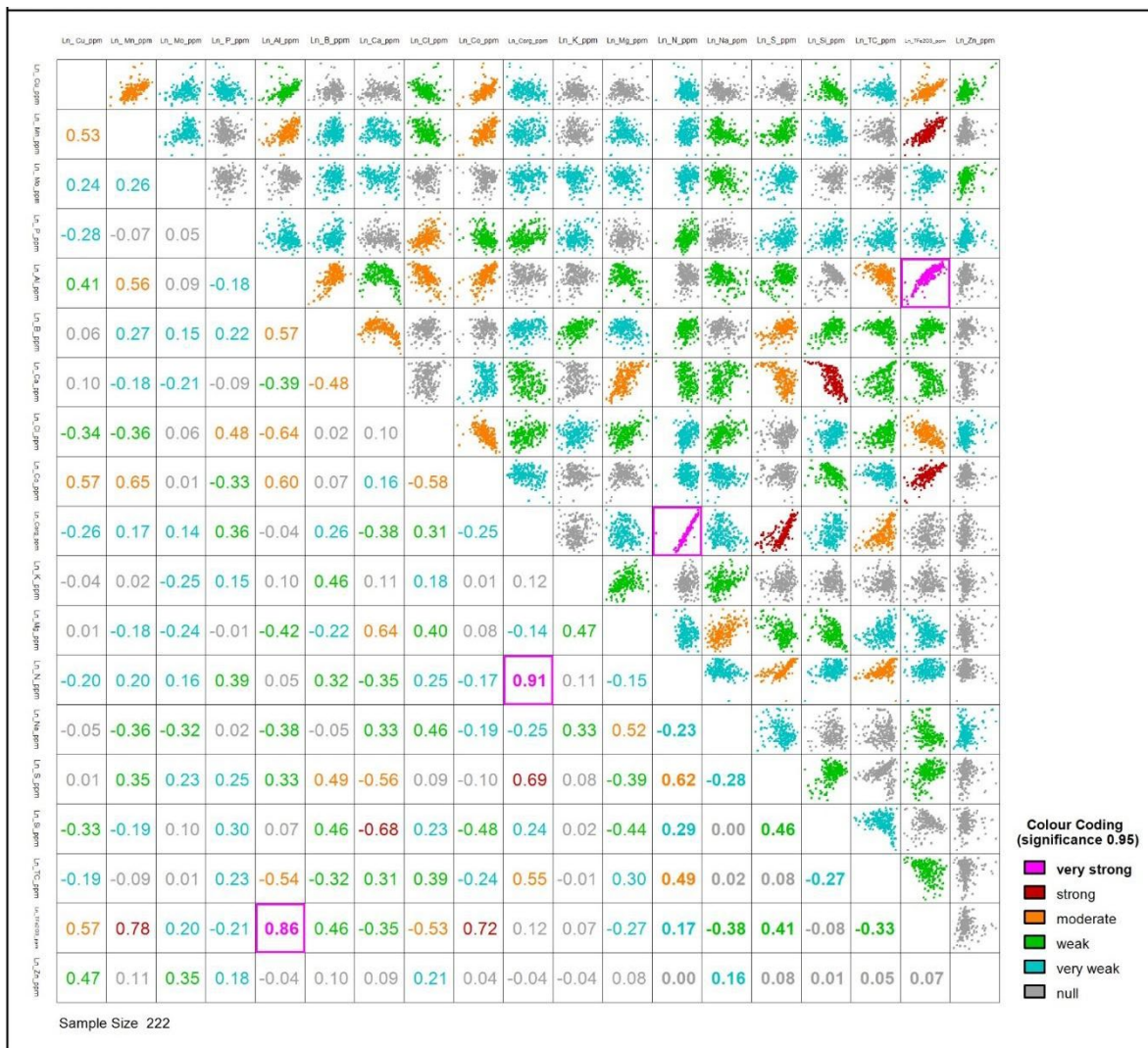


Figura 5.3.3. Correlaciones bivariadas en sedimentos de corriente del dominio metamórfico del Proterozoico entre Bambamarca y Pisúquia, norte del Perú. Tomado de De La Cruz (2018).

5.4 Estadística Multivariada

En ciencias de la tierra, por lo general, se tratan datos multivariados. Si se requiere describir una entidad geológica, por ejemplo, un cuerpo plutónico, será necesario medir varias variables; y si además se necesita estudiar el proceso geológico que le dio origen, se tendrá que considerar a un conjunto de variables que condicionaron su ocurrencia. Naturalmente, todas estas variables van a estar relacionadas entre sí y con los objetos de estudio (Mena, 2016).

El análisis multivariante trabaja en un espacio de muestreo de muchas dimensiones, siendo difícil representar gráficamente las interrelaciones entre las variables. Por esto, muchas veces el enfoque está puesto en reducir la dimensionalidad de los datos, para que sea factible realizar interpretaciones gráficas en dos o tres dimensiones. Todo análisis multivariante debería comenzar con un análisis exploratorio individual de cada variable y seguir con la elaboración de gráficos de dispersión bivariados, entre todos los pares de variables posibles. Dado que se necesita saber si se evidencian relaciones o subpoblaciones o datos atípicos. Luego se pueden calcular los coeficientes de correlación y las regresiones bivariadas.

De esta manera se tendrá un panorama de las distribuciones y de la independencia o correlación entre las variables, antes de entrar en el análisis conjunto de todas ellas. Una consideración que no debemos olvidar es que, un análisis multivariante requiere de muestras grandes.

5.4.1 Análisis de factores (AF)

Consiste en encontrar una manera de condensar la información de las variables originales, en una serie más pequeña de dimensiones compuestas o valores teóricos nuevos, con una mínima pérdida de información. En el AF el interés está puesto en la estructura de las correlaciones entre las variables. Lo que se busca son variables hipotéticas llamadas factores, que expliquen a las variables observadas. Hay factores comunes a todas las variables, los que se estiman con el modelo, y también factores únicos que solo actúan en cada variable en particular y que no están correlacionados entre sí y tampoco con los factores comunes.

Se dispone de varios métodos para extraer factores. El más recurrente es el análisis de componentes principales (ACP), al que se agregan el de mínimos cuadrados no ponderados, mínimos cuadrados generalizados, máxima verosimilitud y otros de factorización.

Las diferencias entre el AF y el ACP es que, el primero explica y representa correlaciones y no observaciones. Es así que, al existir varios procedimientos se pueden obtener varias soluciones. Por otra parte, en el AF al añadir o quitar un factor cambian todos los factores anteriores. En el ACP se pueden hacer rotaciones de los ejes de los factores y analizar los resultados mediante gráficos 2D (biplots).

A diferencia del análisis de componentes principales, esta técnica nos permite conocer el número de factores necesarios o confirmar si los factores fijados son los adecuados para facilitar la investigación.

5.4.2 Análisis de componentes principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP), es probablemente la más antigua y mejor conocida de las técnicas de análisis multivariante. Fue introducido por primera vez por Pearson (1901) y desarrollado por Hotelling (1933). Es uno de los resultados más valiosos del álgebra lineal aplicada, usada en todas las formas de análisis, desde la neurociencia hasta los gráficos por computadora. La idea principal es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos en los que hay una gran cantidad de variables interrelacionadas, reteniendo la mayor cantidad posible de la variación presente en el conjunto de datos. Esta reducción se logra transformando a un nuevo conjunto de variables, ordenadas de manera que las primeras retienen la mayor parte de la variación presente en todas las variables originales (varianza total explicada).

Según Davis (2002) & Wackernagel (2003), es un método basado en la diagonalización de la matriz de correlación, que busca crear a partir de las variables originales, un grupo de variables sintéticas o “factores”, las cuales están jerarquizadas y mutuamente no correlacionadas, descomponiendo la información multivariable.

Los datos geoquímicos son considerados datos composicionales “cerrados”, ya que tienden a conformar un todo, es decir, que si contamos con información para varios elementos; podemos conocer hasta el 100% de la composición química de un material geológico. Para evitar obtener correlaciones espurias o falsas correlaciones entre variables, es necesario “abrir” los datos antes de aplicar el ACP; para lo cual existen varias metodologías de transformación matemáticas. Entre las más comunes se destaca la CLR, por sus siglas en inglés *Centered Log Ratio*, que consiste en tomar la concentración logarítmica de cada elemento y se divide por la media geométrica de todos los elementos para cada muestra (Rollinson 1993).

El método ACP se basa en obtener autovalores y autovectores de la matriz de varianza (S) o de la matriz de correlación (R). El interés radica en la información aportada por los objetos de estudio, ya que se busca describir los valores observados de “p” variables, mediante un número $q < p$ de variables no correlacionadas entre sí, formadas por combinaciones lineales de las variables originales, que son los componentes principales (Mena, 2016). Es común definir los componentes principales como:

$$z = A'x^*$$

Donde:

A: tiene columnas que constan de los vectores propios de la matriz de correlación.

x^* : consta de variables estandarizadas.

Un aspecto clave en el ACP es la interpretación de los factores, ya que esta no viene dada *a priori*, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales. Por lo que, es necesario evaluar tanto el signo como la magnitud de las correlaciones. Las fases de un análisis de componentes principales son: análisis de la matriz de correlaciones, selección de factores, análisis de la matriz factorial, interpretación de los factores y cálculo de las puntuaciones factoriales.

El ACP tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, es indicativo de que existe información redundante y, por lo tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

Para determinar los componentes a retener se pueden emplear diferentes criterios. Por ejemplo, retener solo aquellas con autovalores >1 , o retener tantas componentes como sea necesario para explicar el 75% o el 90% de la variabilidad total, o graficar los autovalores en función de su orden (gráfico de sedimentación) y buscar el quiebre de la pendiente (codo) y retener solo los componentes anteriores a dicho quiebre (Figura 5.4.1.).

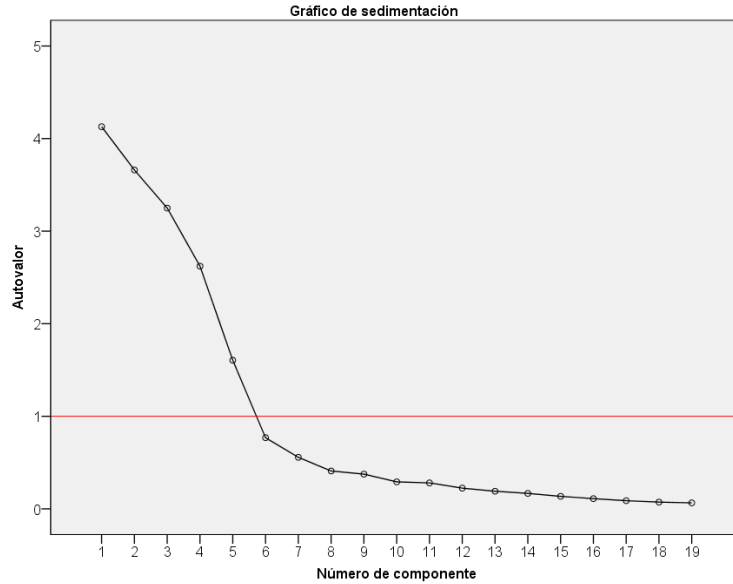


Figura 5.4.1. Gráfico de sedimentación del ACP en suelos superficiales del centro del Perú, elaboración propia.

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de esta representa los coeficientes factoriales de las variables. Es decir, las correlaciones entre las variables y los componentes principales (Figura 5.4.2.). La matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables.

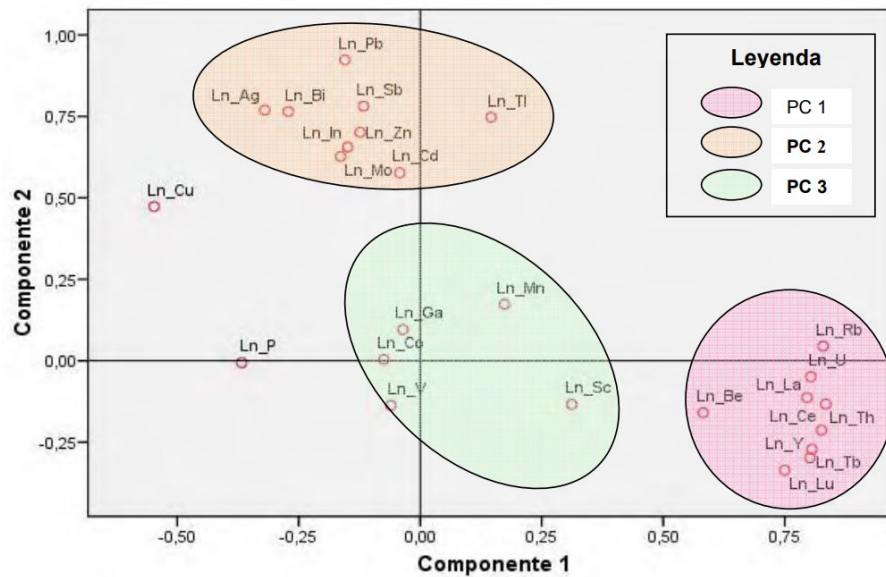


Figura 5.4.2. Asociaciones geoquímica componente 1 vs componente 2. Tomado de Vargas (2007).

Para que un componente sea fácilmente interpretable debe tener las siguientes características: los coeficientes factoriales deben ser próximos a 1, una variable debe tener coeficientes elevados sólo con un componente, y no deben existir componentes con coeficientes similares (Tabla 2).

Tabla 2. Matriz de componentes rotados en muestras de suelos superficiales del valle del Mantaro - Perú. Elaboración propia.

Variables	Componente				
	1	2	3	4	5
Ln_N_ppm	.940	-.138	.039	-.050	-.011
Ln_TC_ppm	.694	.567	-.197	-.026	-.153
Ln_S_ppm	.613	-.304	.155	.536	-.041
Ln_P_ppm	.544	.093	-.289	.204	-.244
Ln_Ca_ppm	-.093	.889	-.091	.167	-.038
Ln_Si_ppm	.046	-.834	-.344	.086	-.015
Ln_Mg_ppm	-.033	.680	-.127	.265	.501
Ln_B_ppm	.085	-.646	.235	-.045	.495
Ln_Co_ppm	-.182	.301	.843	.044	.021
Ln_Al_ppm	-.134	-.539	.698	-.201	.206
Ln_Mn_ppm	.263	.066	.634	.411	-.316
Ln_Cl_ppm	.297	.065	-.543	.530	.277
Ln_Zn_ppm	.032	.166	.010	.910	.056
Ln_Cu_ppm	-.121	.131	.322	.853	.102
Ln_K_ppm	.004	-.105	.088	.011	.899
Ln_Na_ppm	-.288	.063	-.275	.351	.730
Ln_Mo_ppm	.282	-.021	-.054	.506	-.541

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

La rotación ha convergido en 7 iteraciones.

5.4.3 Análisis clúster

Conocido como análisis de conglomerados, es una técnica estadística multivariante que busca agrupar las variables tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. El objetivo es obtener clasificaciones (*clusters*) teniendo un marcado análisis exploratorio.

La forma general busca una partición de m objetos en un conjunto de grupos, donde un objeto pertenezca a un solo grupo y el conjunto de dichos grupos contenga a todos los objetos. Sea una muestra E de m individuos X_1, \dots, X_m , donde cada uno está representado por un vector n -dimensional $X_j = (x_{j1} x_{j2} \dots x_{jn})$, $j = 1, 2, 3, \dots, m$ y se debe encontrar una partición de la muestra en regiones w_1, \dots, w_c de forma que:

$$\bigcup_{i=1}^c w_i = E$$

$$w_i \cap w_j = \emptyset ; i \neq j$$

La representación de la jerarquía de clusters obtenidos, suele llevarse a cabo a través de un diagrama en forma de árbol invertido, llamado dendrograma (Figura 5.16), en el que las sucesivas fusiones de las ramas a los distintos niveles, informan de las sucesivas fusiones de los grupos hacia grupos de nivel superior (mayor tamaño y menor homogeneidad).

La diferencia fundamental con el análisis discriminante es que, no conocemos los grupos donde vamos a agrupar los datos. Para cuantificar las semejanzas entre los objetos se emplean índices o coeficientes de similitud. Como medidas de similitud se pueden emplear los coeficientes de distancia. A menor distancia entre objetos, mayor es la similitud. La distancia entre el objeto i y el objeto k la podemos definir empleando por ejemplo, las diferencias entre los valores que toma cada una de las p variables, según la distancia euclídeana, de Manhattan o de Mahalanobis.

La distancia euclídeana mide la menor distancia entre puntos, mientras que la de Manhattan suma las distancias pro variables, esto lo podemos visualizar pensando que, si empleamos dos variables, con dos objetos podemos formar un triángulo rectángulo con los catetos paralelos a los ejes de las variables. La suma de los catetos representa la distancia de Manhattan y la hipotenusa representa la distancia euclídeana.

El problema de estos cálculos es que, ni las sumas ni las medias tienen significado físico porque estamos promediando variables diferentes y muchas veces escalas diferentes, entonces antes de aplicar estos coeficientes es mejor estandarizar los datos. Si calculamos la distancia con los datos normalizados, tenemos la distancia euclídeana normalizada.

El esquema de clasificación más empleado es el jerárquico, que comienza buscando el par de individuos más parecidos y luego se va buscando todos los pares de mayor similitud en orden decreciente. Esta estructura se especifica mediante un diagrama de árbol o dendrograma (Figura 5.4.3).

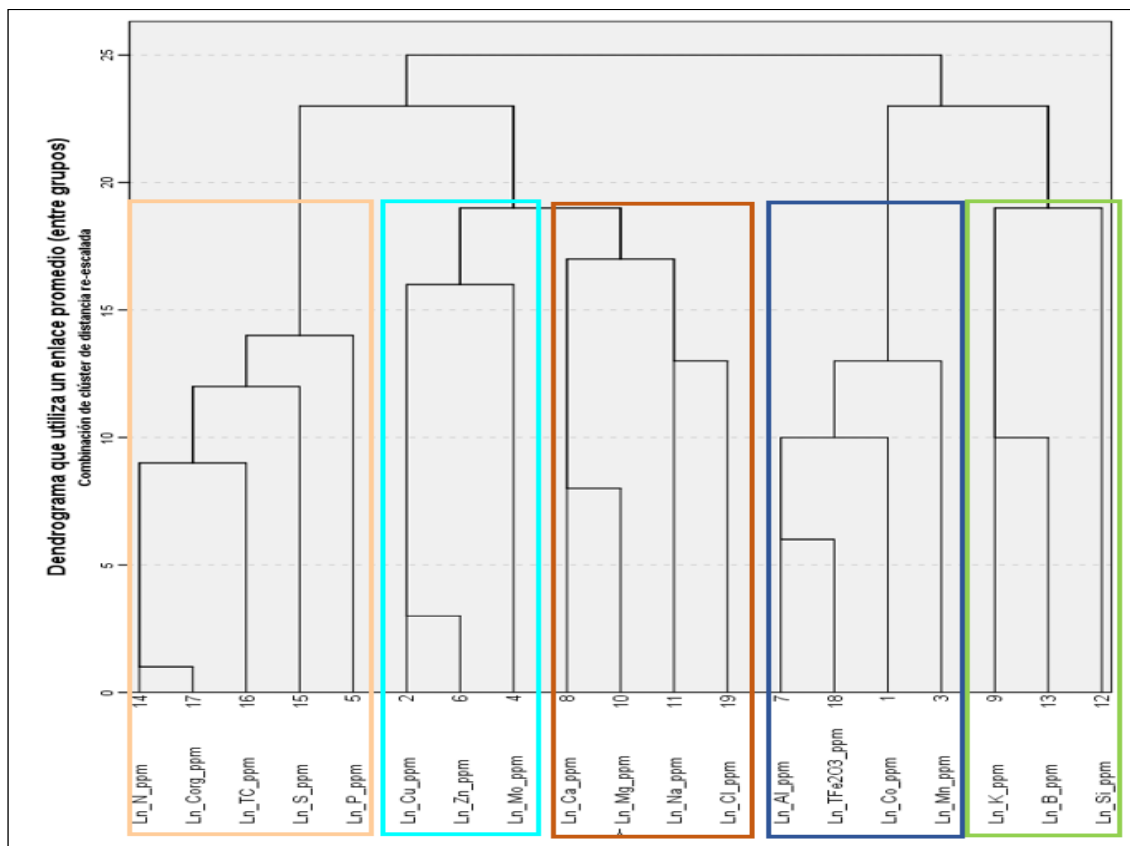


Figura 5.4.3. Clústeres jerárquicos de elementos químicos en sedimentos de corriente provenientes del dominio volcánico del Paleozoico superior en el norte del Perú. Tomado de De La Cruz (2018).

5.5 Estadística Predictiva

Los enfoques y técnicas utilizados para el análisis predictivo (Figura 5.17) pueden agruparse de manera general en técnicas de regresión y técnicas de aprendizaje computacional. Entre las técnicas de regresión se tienen: el modelo de regresión lineal, análisis de supervivencia o duración, arboles de clasificación y regresión, y curvas de regresión multivariable. Como parte de las técnicas de aprendizaje computacional destacan: redes neuronales, máquina de soporte vectorial, Naive Bayes y k-vecinos más cercanos (Espino, 2017). Asimismo, las técnicas mencionadas que son usadas en big data pueden procesar información de diferentes tipos de yacimientos, teniendo en cuenta que para cada problema existe un algoritmo para resolverlos (Suarez, 2019; Desharnais *et al.*, 2017).

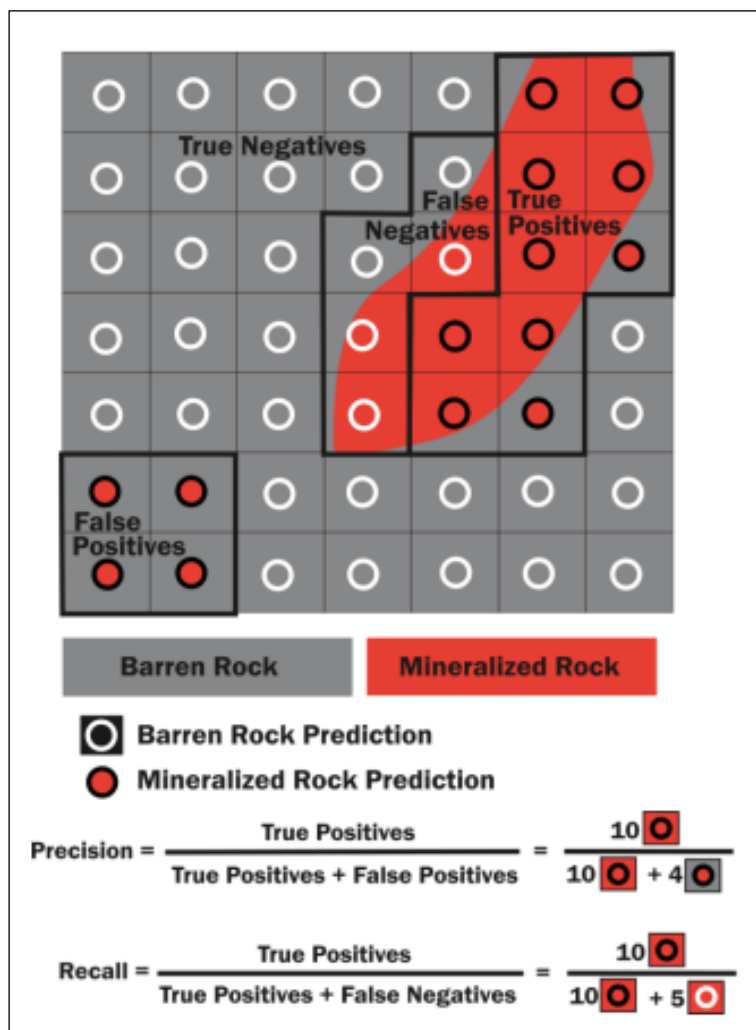


Figura 5.5.1. Modelo de predictivo aplicado a la exploración minera y fórmulas de precisión y recall (recuperación de información). Tomado de Desharnais et al. (2017).

La técnica de mapeo de singularidades es una poderosa herramienta multifractal para detectar anomalías geoquímicas débiles. Sin embargo, el algoritmo original para la estimación de la singularidad no podía procesar directamente los datos que contiene valores negativos y el índice de singularidad resultante está influenciado por el valor de fondo. Para resolver estos

problemas, se introduce un algoritmo modificado. Para ello, se desarrolló un sencillo programa Matlab para la estimación del índice de singularidad. El estudio de caso del distrito polimetálico de Chaobuleng Fe cubierto de pastizales en Mongolia Interior en el norte de China demuestra las ventajas del método modificado (Figura 5.5.2).

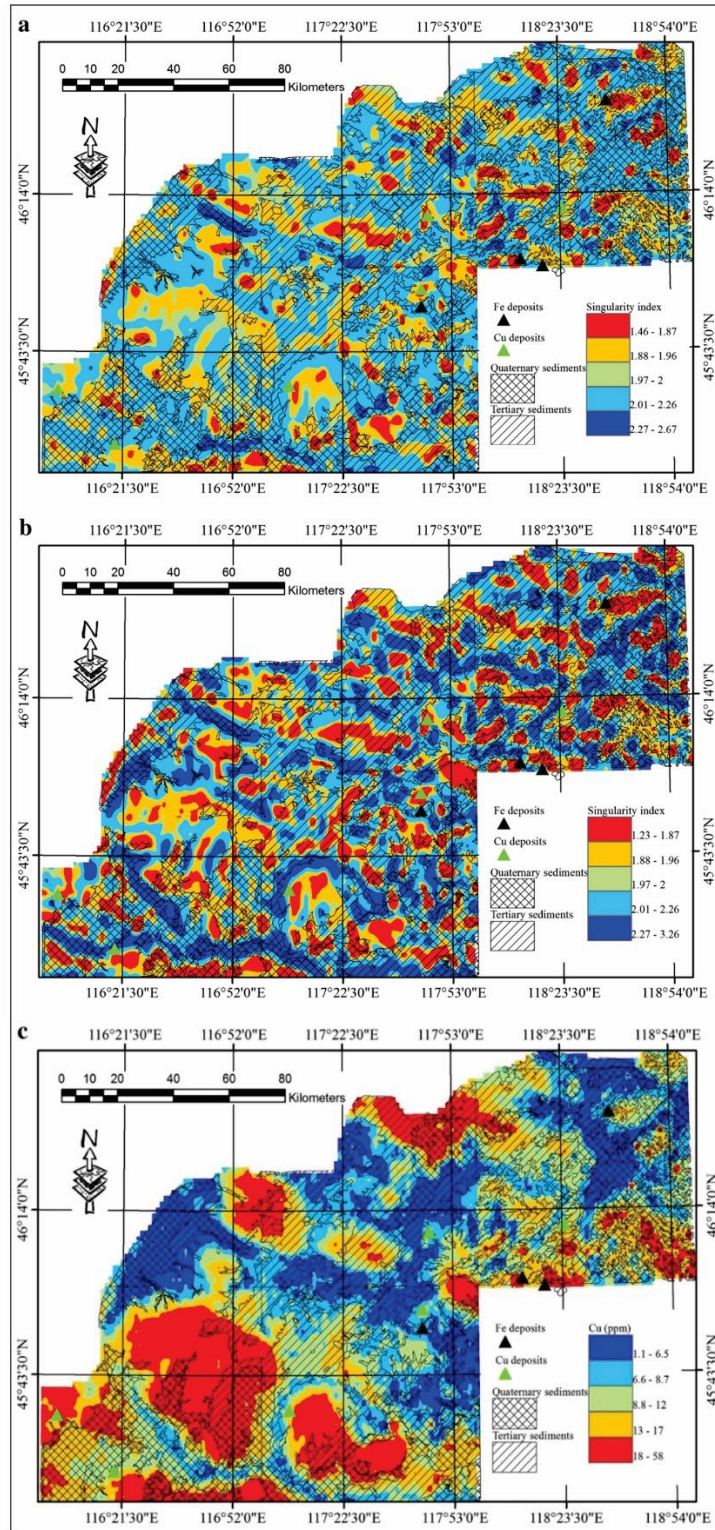


Figura 5.5.2. Mapas que muestran la distribución espacial del índice de singularidad estimado para Cu usando (a) algoritmo original, (b) algoritmo modificado y (c) sus diferencias. Tomado de Zuo et al. (2015).

5.6 Determinación de parámetros geoquímicos y anomalías

El reconocimiento de una anomalía geoquímica requiere que se haya establecido el valor de fondo geoquímico, que puede ser difícil de definir. Los valores geoquímicos que se distinguen del fondo, es decir, aquellos valores que son atípicos, pueden ser anómalos.

Howarth y Sinding-Larsen (1983) discuten el concepto de anomalía y sugieren que las concentraciones anómalas, son aquellos valores que superan un umbral determinado. La Asociación de Geoquímicos de Exploración (AEG) en 1983 y 1985 concluyó que una anomalía es un nivel deseado de abundancia, en el que el geólogo tiene un interés particular y es diferente de los valores regionales o de fondo (Garrett 1984; Aucott 1987).

Históricamente, los valores que exceden el percentil 95 fueron examinados en busca de su potencial para ser identificados como anomalías geoquímicas. Además, el umbral se definió como la media \pm 2 desviaciones estándar (Hawkes y Webb 1962; Howarth 1983).

Esta definición se basó en el supuesto de normalidad de los datos. Sin embargo, con la introducción de métodos informáticos para evaluar datos geoquímicos, la capacidad de estudiar poblaciones de muestras y la naturaleza de las distribuciones geoquímicas, han proporcionado herramientas poderosas para la identificación de valores atípicos y especímenes que podrían estar relacionados con *targets* de mineralización (anomalías) o efectos antropogénicos. Filzmoser et al (2005) describen un enfoque para la detección de valores atípicos y anomalías, utilizando métodos robustos y técnicas adaptativas para reconocer valores atípicos.

Los parámetros geoquímicos de distintas áreas están controlados por factores naturales como la mineralización y la litología, además de la contaminación local, principalmente causada por la minería, la producción de metales y las centrales eléctricas de carbón (Yotova et al.2018). También está demostrado que el fondo geoquímico puede cambiar de un área a otra, dentro de una región y entre regiones. Aunque los promedios globales son de uso general, no se pueden definir niveles de fondo globales de elementos específicos, en el mejor de los casos se pueden hacer estimaciones operativas regionales o locales, aunque con ciertas salvedades (Reiman & Garret, 2005).

Asimismo, para determinar una anomalía es necesario separar cada concentración geoquímica y/o contenido mineral correspondiente al fondo regional, que es la respuesta a todos aquellos procesos que han tenido lugar en toda la zona estudiada, de la parte anómala, que es la manifestación de aquellos procesos que solo han actuado localmente y que en principio se asociarán a la existencia de mineralizaciones. En otras palabras, todo valor que se aparte del fondo regional será considerado anómalo.

La determinación del *background*, *threshold* y *anomalías* se puede realizar a través de:

- Métodos clásicos, empleando: [Media + 2σ] o [Mediana + 2MAD].
- Las frecuencias acumuladas de una población en un gráfico log-probabilístico.
- El análisis fractal.

Los gráficos de probabilidad acumulada, log-probabilísticos definen de forma clara el valor del fondo, umbral y las anomalías. Asimismo, vienen respaldados por varios estudios por más de dos décadas (Reiman *et al.*, 2005; Turiel & Barrachina, 1987). Además, en estos últimos años el método fractal viene demostrando su efectividad para la estimación de los umbrales geoquímicos (Baldé & Lastra, 2018; Fernández, 2017).

5.6.1 Valor de fondo o background

El *background* es definido como el nivel de fondo o valor normal de un elemento particular en un ambiente geológico, geomorfológico y geoquímico determinado (Rivera, 2007) (Fig. 5.19).

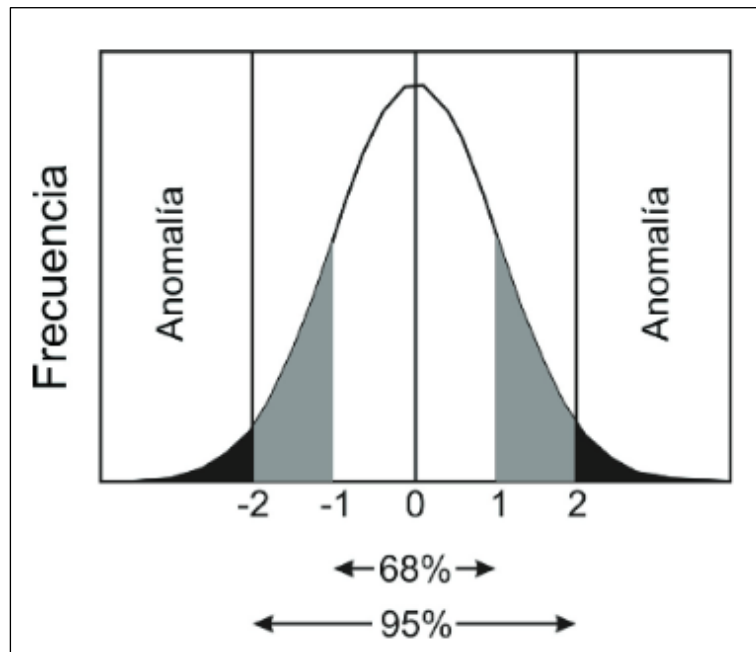


Figura 5.6.1 Intervalos de background (68%), threshold (68%-95%) y anomalía (>97.5% o <2.5%). Tomado de García & Moreno (2006).

5.6.2 Umbral geoquímico o threshold

Garrett (1991) definió el umbral como el límite exterior de la variación del fondo. Se utiliza el término exterior en lugar de superior. Esto permite que la definición incluya tanto límites superiores como inferiores, ya que es común que en algunos entornos geoquímicos los halos de empobrecimiento sean tan importantes como los halos de enriquecimiento. Reimann *et al.* (2005) perfeccionaron aún más la definición de umbral y sus antecedentes, basándose en métodos sólidos. Las observaciones de distribuciones que representan procesos de interés (mineralización o efectos antropogénicos), generalmente se superponen con observaciones de distribuciones de fondo, de modo que el umbral es más probable que sea un rango de valores donde las dos distribuciones se superponen.

En lugar de elegir un valor específico de umbral, puede ser mejor asignar una probabilidad de que un espécimen desconocido pertenezca a cada población. En los levantamientos geoquímicos, las anomalías

tienen una asociación espacial y son a su vez pequeñas, que solo ocupan una fracción del área cubierta por la población regional. El umbral se puede determinar de las siguientes maneras:

1. Comparación de datos a partir de la bibliografía o los resultados de una exploración de orientación. Es útil si solo unos pocos análisis de un área están disponibles. Es aplicable si una exploración de orientación ha sido realizada, tal y como debe ser para toda región.
2. Cálculo por el método clásico, a partir de la media más dos veces la desviación estándar.
3. Cálculo gráfico, a partir de la frecuencia acumulativa, según el método de Lepeltier (1969). Es la agrupación de valores en un número adecuado de intervalos logarítmicos. El umbral es la frecuencia correspondiente al 2.5%.
4. Método fractal.

El concepto de umbral puede extenderse de datos de un solo elemento a datos de elementos múltiples, mediante el uso de métodos estadísticos multivariados, como el uso de la distancia de Mahalanobis (Garrett 1989c). En el caso multivariado, el umbral se puede seleccionar sobre la base del análisis de las gráficas de distancia de Mahalanobis o alguna otra medida similar.

5.6.3. Anomalías Geoquímicas

El objetivo de la investigación geoquímica es la detección de zonas espacialmente continuas de valores elevados de un elemento estratégico, que superan un valor de umbral geoquímico específico. Las observaciones que superan dicho umbral se denominan anomalías geoquímicas.

Tradicionalmente, la anomalía geoquímica está definida como el valor por encima del threshold (Rivera, 2007). Asimismo, una anomalía es una desviación con respecto a la norma. Por lo tanto, una anomalía geoquímica es una variación de la distribución geoquímica normal, correspondiente a un área o a un ambiente geoquímico (Fig. 5.6.2).

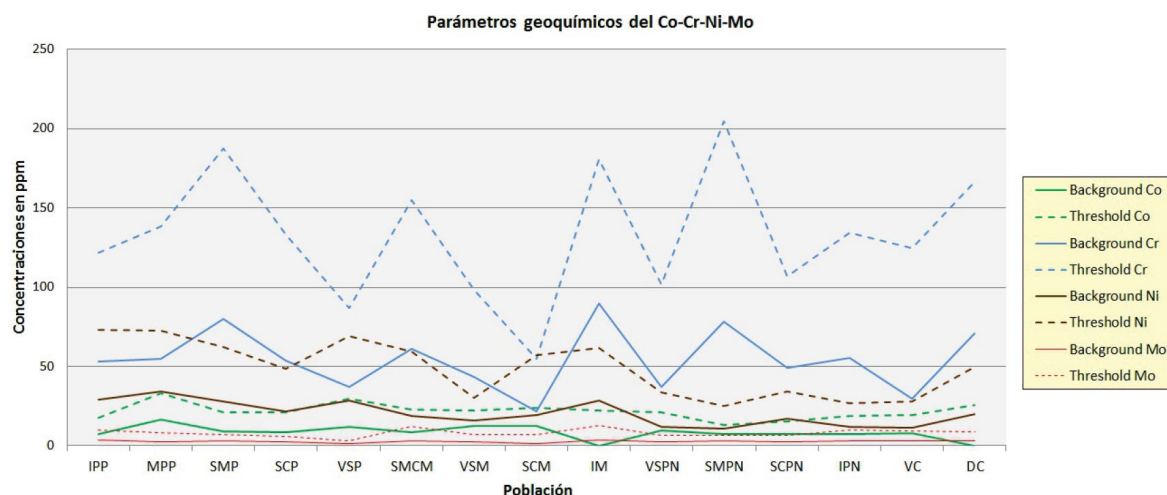


Figura 5.6.2. Valores de fondo y umbrales geoquímicos de Co, Cr, Ni y Mo sedimentos fluviales, según el dominio geológico. Tomado del Atlas Geoquímico del Perú (2017).

Un valor atípico se puede definir como una observación que tiene un valor distintivamente diferente de las observaciones con las que está íntimamente asociado. Si se ha definido un umbral, un valor atípico, de forma predeterminada, excede el umbral. Los valores atípicos pueden ser importantes desde el punto de vista de la exploración o la contaminación. Un valor atípico puede definir una zona mineralizada (anomalía) o un valor que está por encima de un nivel de fondo ambiental aceptado. Los valores atípicos también pueden ser ruido de resultados analíticos o entradas de datos erróneos. Un valor atípico puede identificarse como una anomalía geoquímica si supera el umbral, no es el resultado de un problema analítico o la asignación a una población inadecuada. En otras palabras, una anomalía está asociada con un proceso de interés (alteración o mineralización), mientras que un valor atípico es un valor sin una interpretación que requiere una evaluación adicional.

Los valores atípicos siempre deben examinarse cuidadosamente para asegurarse de que no sean el resultado de un error. Una observación que es un valor atípico de un grupo puede ser indistinguible (enmascarado) de otras observaciones dentro de otro grupo.

En la práctica, los valores atípicos se evalúan mediante un examen gráfico de las clasificaciones superior e inferior de los datos, y la identificación de las observaciones que se producen como rupturas distintas de la población de fondo. La aplicación de una transformación puede ser suficiente para separar el fondo de los valores atípicos.

Ejemplo de Portugal

Definición e identificación de anomalías geoquímicas en la región minera de Neves Corvo, la principal mina de cobre de Portugal (Batista, 2003). La determinación del mapa predictivo se basó en análisis de regresión por etapas con el objetivo de diferenciar la ocurrencia de anomalías naturales y anomalías producto de las actividades mineras en suelos. Se utilizó un conjunto de muestras de suelos (analizadas del archivo de testigos anteriores a la existencia de la Mina Neves Corvo y designada como 1ª campaña) escogidas en una zona donde no se conocían explotaciones mineras y además contaban con un número razonable de muestras de suelo desarrolladas en el Complejo Volcano Sedimentario -CVS- (litología huésped de mineralización) y la formación de metasedimentos Flysch. También se realizó una campaña de muestreo de suelos en los mismos sitios de las muestras anteriores. Los dos conjuntos se analizaron al mismo tiempo y por los mismos métodos analíticos. Se asignaron variables independientes a la litología (CVS y Flysch), y los contenidos totales de Fe, Mn, Ca y Al. El Cu se les asignó como la variable dependiente.

Estas muestras se utilizan para el cálculo utilizando la ecuación de regresión lineal:

$$Me = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$$

En donde: Me es el contenido de la variable dependiente en este caso Cu; a_0 es una constante, $a_1 \dots a_n$ son los coeficientes relacionados con las variables independientes anteriores. Debido a que el Al en el conjunto de variables independientes no introdujo una contribución significativa a la ecuación, se excluyó del análisis. La elección de variables independientes para la ecuación está determinada por una tolerancia mínima, una entrada F y una salida F, que determinan la importancia de las variables independientes.

En la ecuación se incluyó entonces en la litología, Fe, Mn, y finalmente, con una varianza menos significativa, Ca.

Las variables elegidas deberían tener un origen natural y, en la medida de lo posible, independiente de la actividad minera, por tanto, se eligieron Litología, Al, Ca, Fe y Mn.

El siguiente paso del procedimiento tuvo como objetivo obtener una ecuación de regresión lineal por "Stepwise Regression" introduciendo las variables las independientes para calcular el "Cu teórico", a partir del cual, excluyendo el Al, se llega a un porcentaje de explicación del 83% con lo siguiente fórmula:

$$Cu(\text{teórico}) = -3.86299 + (0.283954 \times CVS) + (1.177255 \times Fe) + (0.292893 \times Mn) + (-0.30415 \times Ca)$$

Se denominó "Cu teórico" al resultado de reemplazar las variables Litología (CVS=1 y Flysch=0), Fe, Mn y Ca que determinaban la composición de la ecuación de regresión, porque este Cu se determina a partir de las demás variables. Así, en Litología, variable cualitativa, se reemplazó por el valor "1" cuando se refería al CVS y por el valor "0" cuando se refería a Flysch, y las variables cuantitativas Fe, Mn y Ca fueron reemplazadas por los respectivos resultados obtenidos en los suelos colectados en la última campaña de 1998 en toda la zona. Como resultado se obtuvo el mapa b) de la Figura 5.6.3. Para efectuar comparación con el mapa obtenido anteriormente, se mapearon los resultados reales de Cu obtenidos para los suelos de la campaña de 1998, también para toda el área de estudio y se obtuvo el mapa a) de la Figura 5.6.3. El mapa a) menos el mapa b) dió lugar al mapa residual c) de Fig. 5.6.3, el cual corresponde a las anomalías originadas por la actividad minera (Fig. 5.6.3).

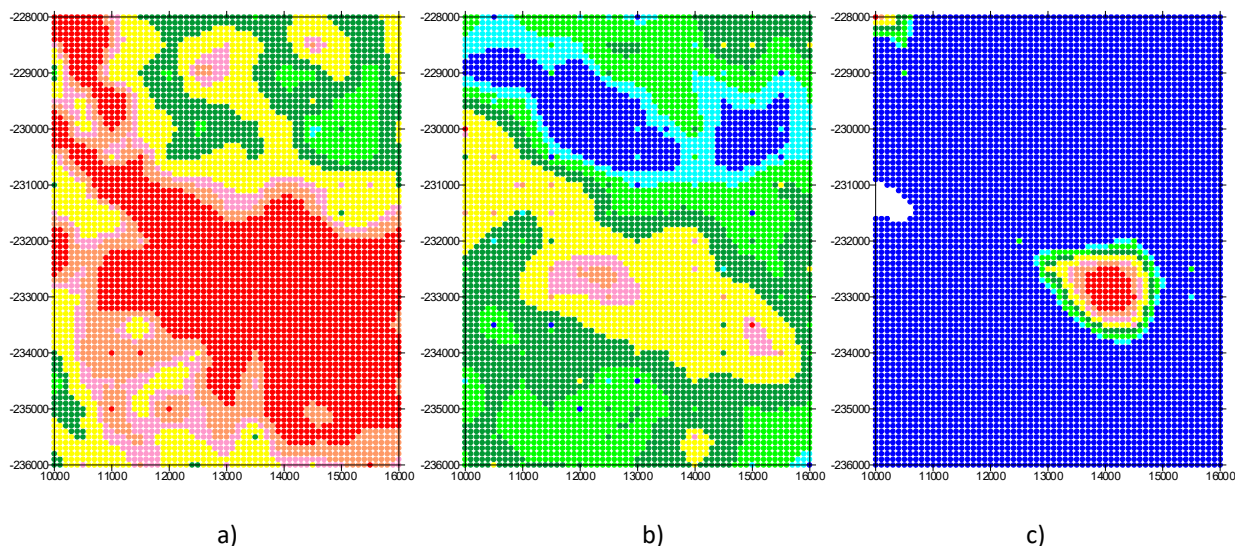


Figura 5.6.3. a) Kriging isotrópico de Cu de las muestras de la campaña de 1998; b) Kriging isotrópico de Cu teórico calculado mediante CVS, Mn, Fe, Ca a partir de las muestras de la campaña de 1998 c) Mapa residual de los dos anteriores reflejando el área de la mina Neves Corvo y por tanto la anomalía resultante de la actividad minera

Capítulo 6 - Mapeo Geoquímico.

Representación Cartográfica

La abundancia relativa de los elementos químicos representada sobre la base cartográfica del territorio conforma los Mapas Geoquímicos o Mapas de Distribución Geográfica de los elementos. La base de datos obtenida a partir de los resultados del laboratorio de cada muestra más las coordenadas de cada sitio de muestreo es el punto de partida de la representación, es decir de la confección del Mapa Geoquímico.

Los mapas geoquímicos pueden representar abundancias relativas de cada elemento (representación univariada), de más de uno (como las representaciones bivariadas), o representar algún tipo de variable luego del procesamiento de los datos, como por ejemplo índices de mineralización (a partir de la suma normalizada y/o ponderada de distintos elementos), cocientes de elementos, *scores* de componentes principales (representando factores litológicos, de mineralización, de contaminación ambiental), etc.

Dicha representación de los datos en los mapas geoquímicos puede ser además de tipo puntual (discreta), a través de la cuenca de drenaje o producto del grillado de los datos de una misma variable a partir de distintas técnicas de interpolación y su representación en el mapa como tal o a través de la confección de mapas de intervalos de contorno.

6.1. Mapas unielementales ó univariados.

Los Mapas Geoquímicos de distribución de cada elemento, univariada, ó mapas unielementales dan cuenta de la distribución de abundancias de una sola variable.

La presentación del mapa es una de las últimas fases del Proyecto de Mapeo Geoquímico, y dado que la escala de trabajo fue parte del diseño del muestreo en función del objetivo buscado, se tomará como regla general que la representación en el mapa sea de un punto/cm² en cualquier escala (Demetriades et al., 2015)

Por ej., si la densidad de muestreo es:

- 1 muestra/Km² (una grilla de 1x1 km) y sobre el mapa consideramos 1 punto/cm², la escala del mapa será 1:100.000;

- 1 muestra/100 km² (una grilla de 10x10 km) y sobre el mapa consideramos 1 punto/cm², la escala del mapa será 1:1.000.000

Los Informes de los Estudios Geoquímicos y las Contribuciones o Relatorios Técnicos deberían presentar como mínimo, distintos mapas temáticos: el de ubicación de sitios de muestreo (y sus etiquetas) donde se identifiquen (si hubiera) las muestras que provienen de distintos proyectos de mapeo geoquímico (Figuras 6.1 y 6.2), y uno por cada variable (elemento ó especie) analizada (Fig. 6.3a y 6.3b).

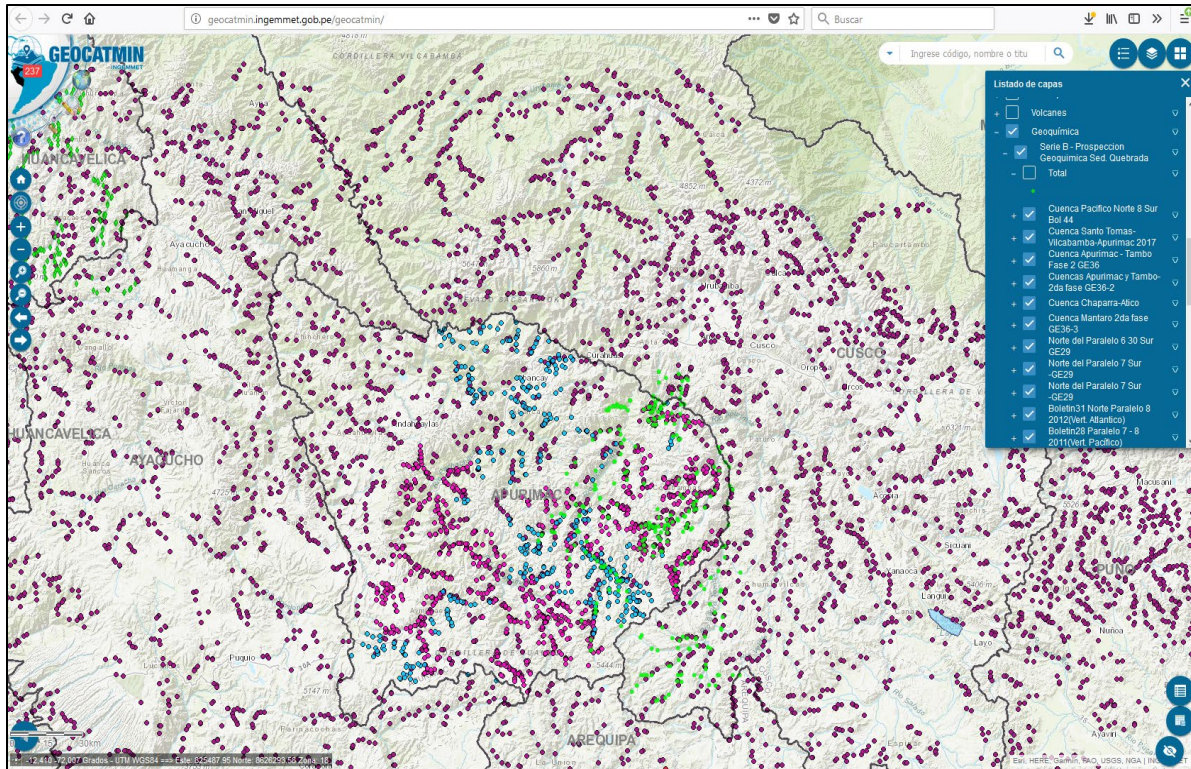


Figura 6.1. Ubicación de los sitios de muestreo geoquímico de distintos proyectos. Portal Web INGEMMET, Perú

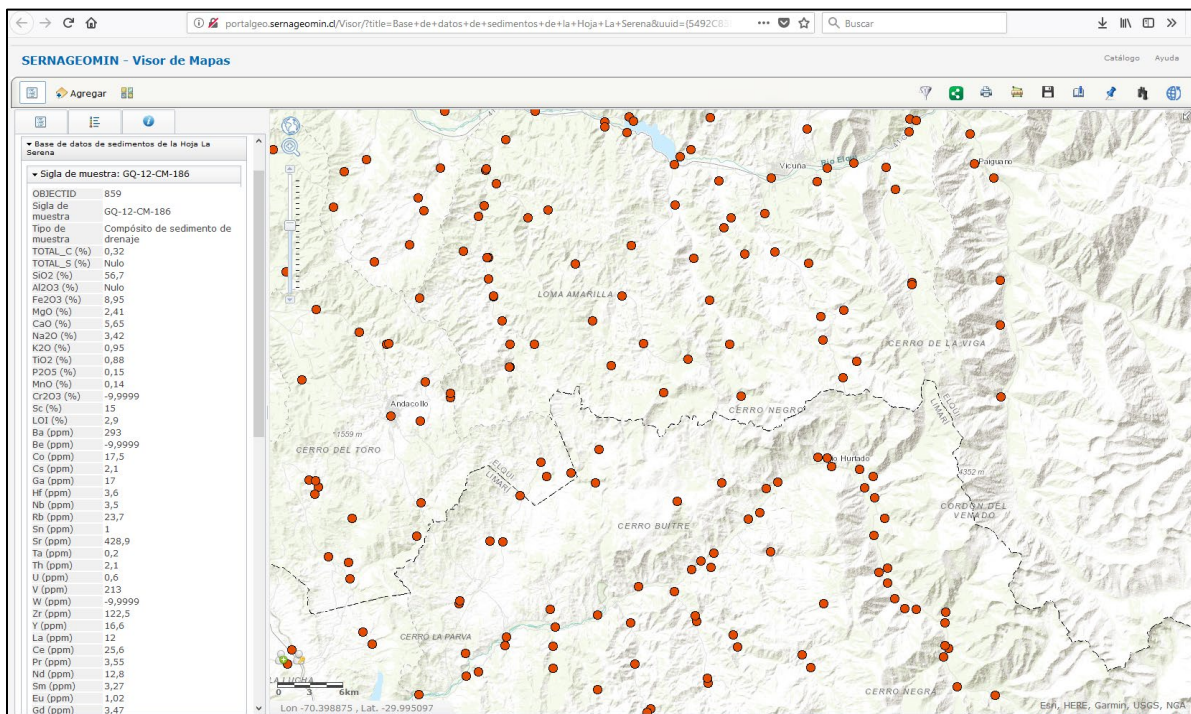


Figura 6.2. Portal Geológico Minero GEOMIN. SERNAGEOMIN, Chile

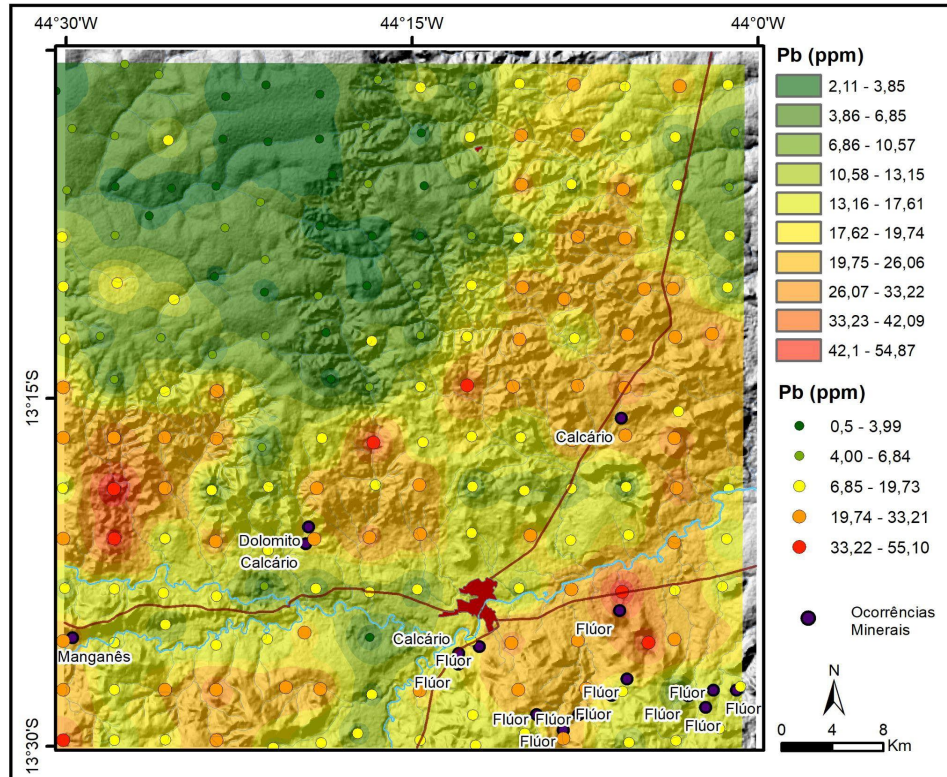


Figura 6.3a: Mapa geoquímico de suelos (Horizonte B, fracción < 80 #) mostrando la distribución de plomo (Pb) en la región de Santa Maria da Vitória, Bahia, Brasil (Santos & Reis, 2021).

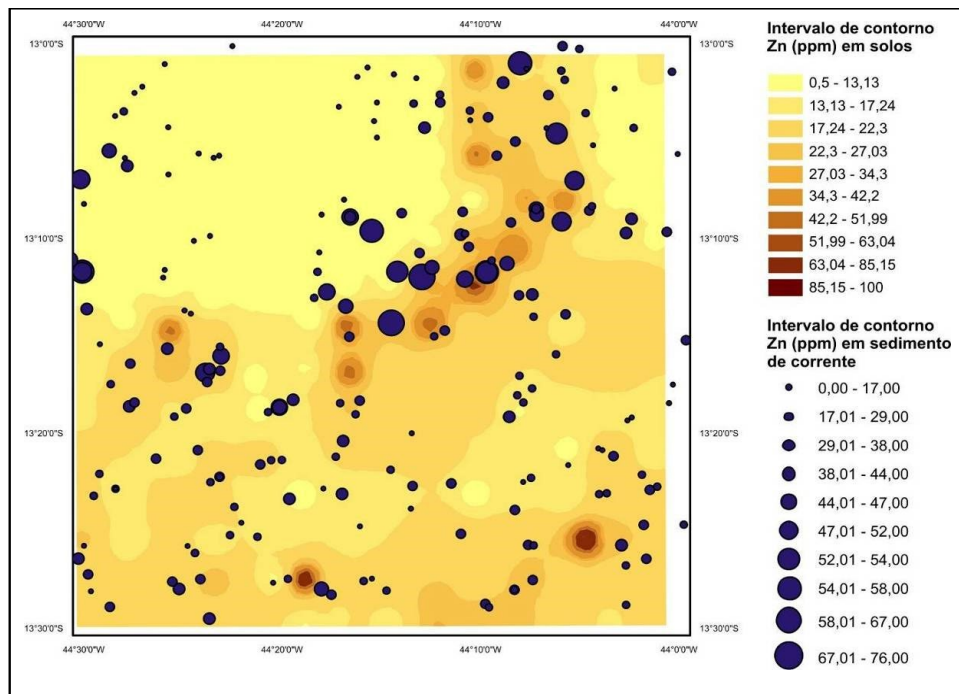


Figura 6.3b: Mapa geoquímico de suelos y sedimentos activos de corriente mostrando la distribución de cinc (Zn) en la región de Santa Maria da Vitória, Bahia, Brasil (Santos & Reis, 2021).

Los mapas geoquímicos univariados son la representación de los datos por cada elemento (ó especie) analizado; la elección de símbolos de representación puntual (discreta) es la forma más extendida (y precisa) de visualización; cada símbolo se asocia con un rango de percentiles que en su conjunto reflejan la distribución geográfica de abundancias: un ejemplo de rangos puede ser: *valor mínimo- 10 percentil, 10- 25 percentil, 25- 50 percentil, 50- 75 percentil, 75- 90 percentil, 90- 95 percentil, 95- 98 percentil y 98 percentil- valor máximo*, además del símbolo que represente todos los casos en los que el resultado no ha sido detectado por el método analítico, es decir *Bajo el Limite de Detección* (Figuras 6.4 y 6.5); en ocasiones la distribución de rangos puede ser una combinación de percentiles (rangos extremos) y escala logarítmica (entre percentiles 10 y 98) como en el Atlas de FOREGS (Figuras 6.6 y 6.7).

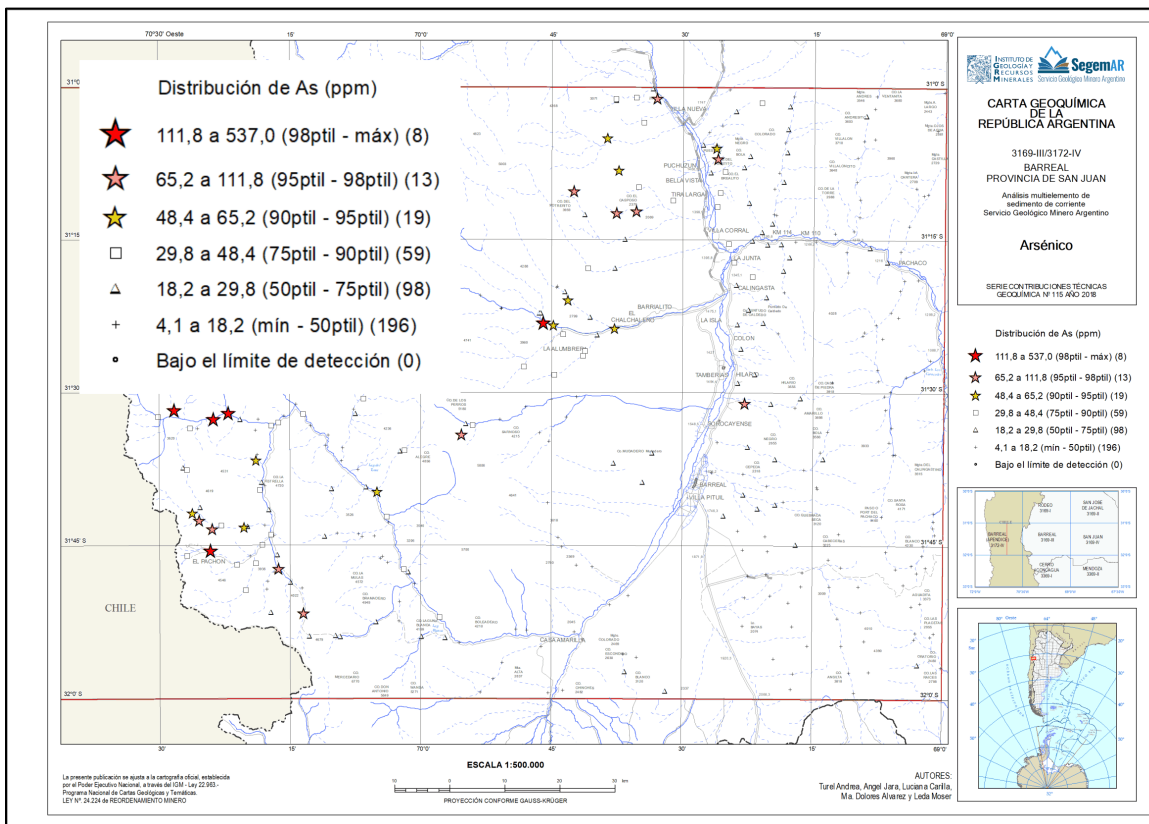


Figura 6.4. Mapa de As. Representación a través de rangos de percentiles. Carta Geoquímica Barreal, San Juan, Argentina. SEGEMAR

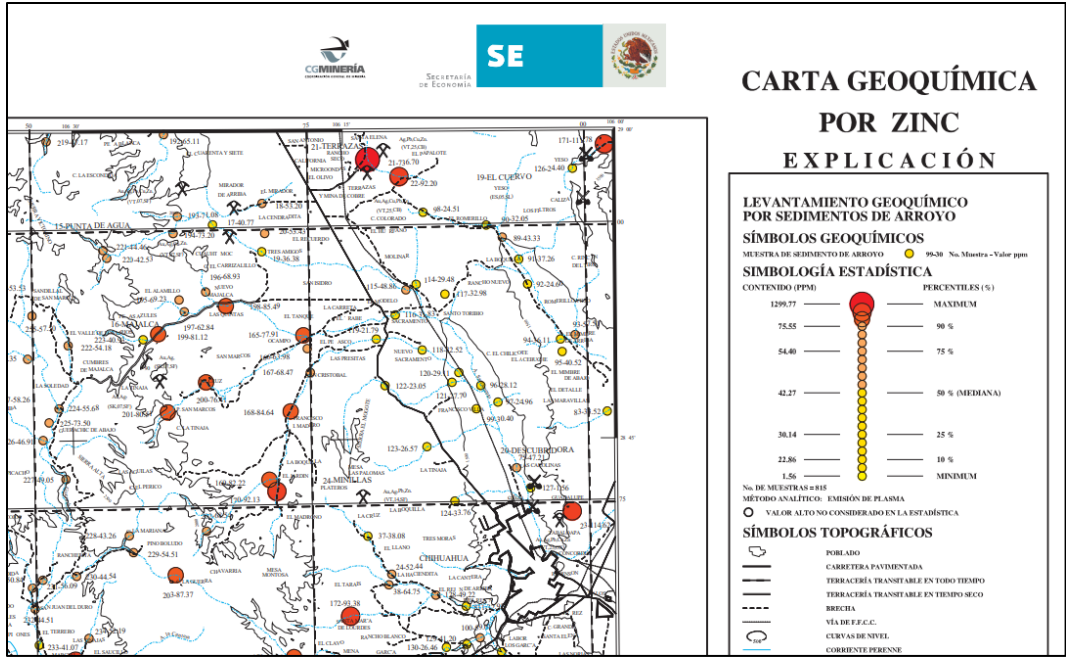


Figura 6.5. Detalle de la Carta Geoquímica por Zinc. Representación de símbolos según escala logarítmica. Servicio Geológico Mexicano

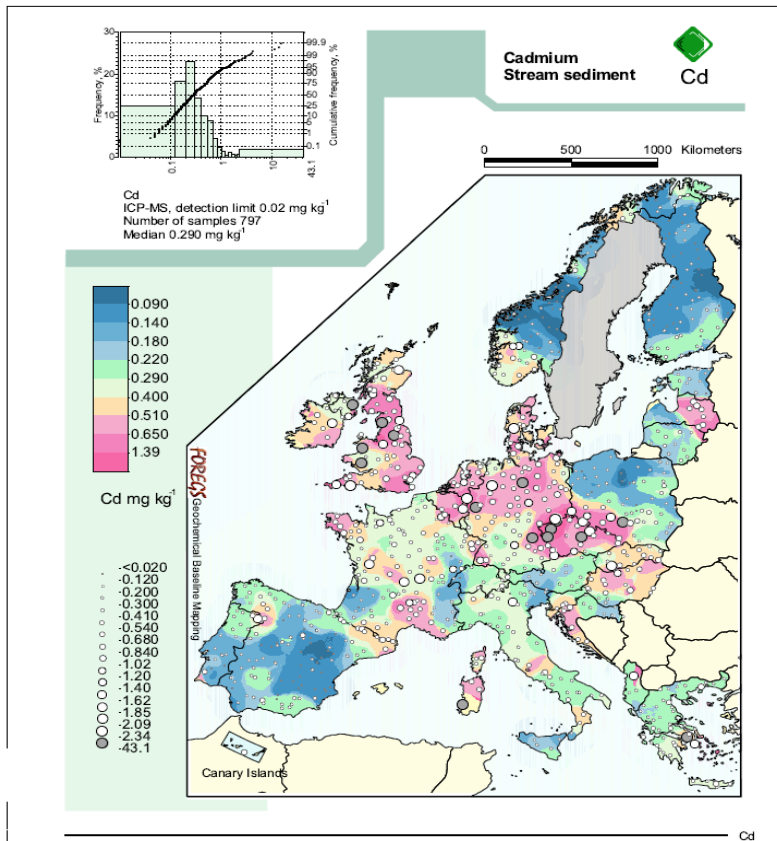


Figura 6.6. Distribución de Cd en sedimentos de corriente. Combinación de representación por símbolos puntuales y por intervalos de contorno. Atlas Geoquímico da Europa, FOREGS (Salminen, et. Al., 2005)

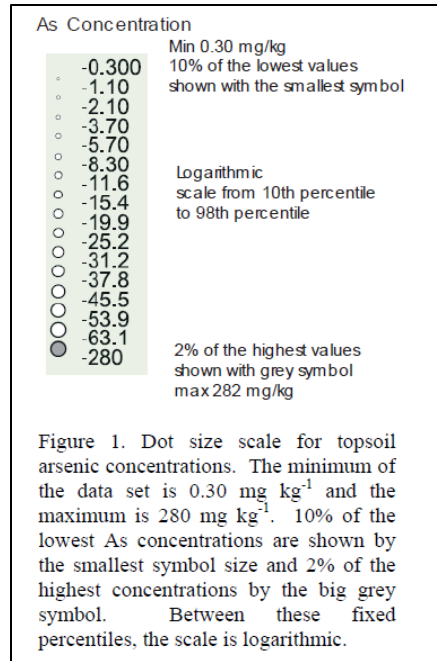


Figura 6.7. Leyenda de los mapas de concentración. Símbolo puntual con escala logarítmica de tamaño entre el 10 y 98 percentiles. El decil inferior representado por el símbolo más pequeño; el 2% de los valores más altos representado por el símbolo de mayor tamaño y en gris. Atlas Geoquímico de Europa, FOREGS (Salminen et al., 2005)

Los mapas de representación puntual suelen diferenciar con un símbolo más grande, relleno o del tipo *bold* los rangos superiores. En términos generales el 90 percentil- valor máximo incluye los valores considerados “anómalos” en estudios exploratorio- prospectivos como también de índole ambiental, motivo por el cual también se los destaca con colores “calientes” en las representaciones puntuales, de grillas (Fig. 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11) ó mapas de contorno, donde varían hacia los colores más “fríos”, celestes ó azules (valores absolutos más bajos de la distribución), pasando por los amarillos y verdes (Fig. 6.12 y 6.13)

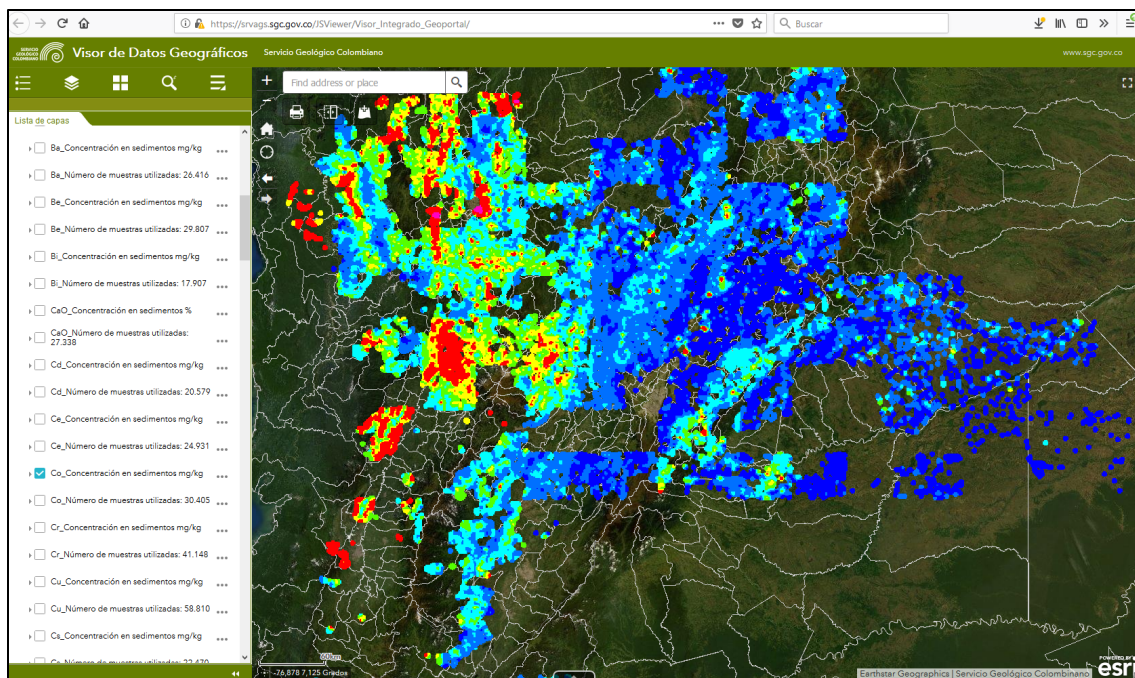


Figura 6.8. Mapa de distribución geográfica de Cobalto. Portal Web Servicio Geológico Colombiano

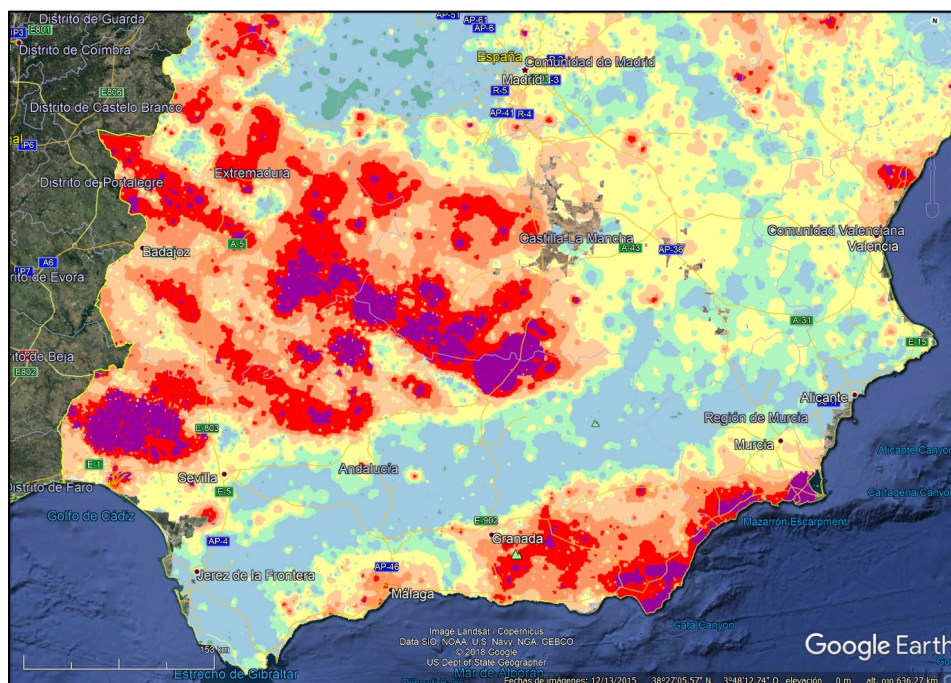


Figura 6.9. Detalle del Mapa de Antimonio (Sb). Atlas Geoquímico de España. Visor Web IGME.

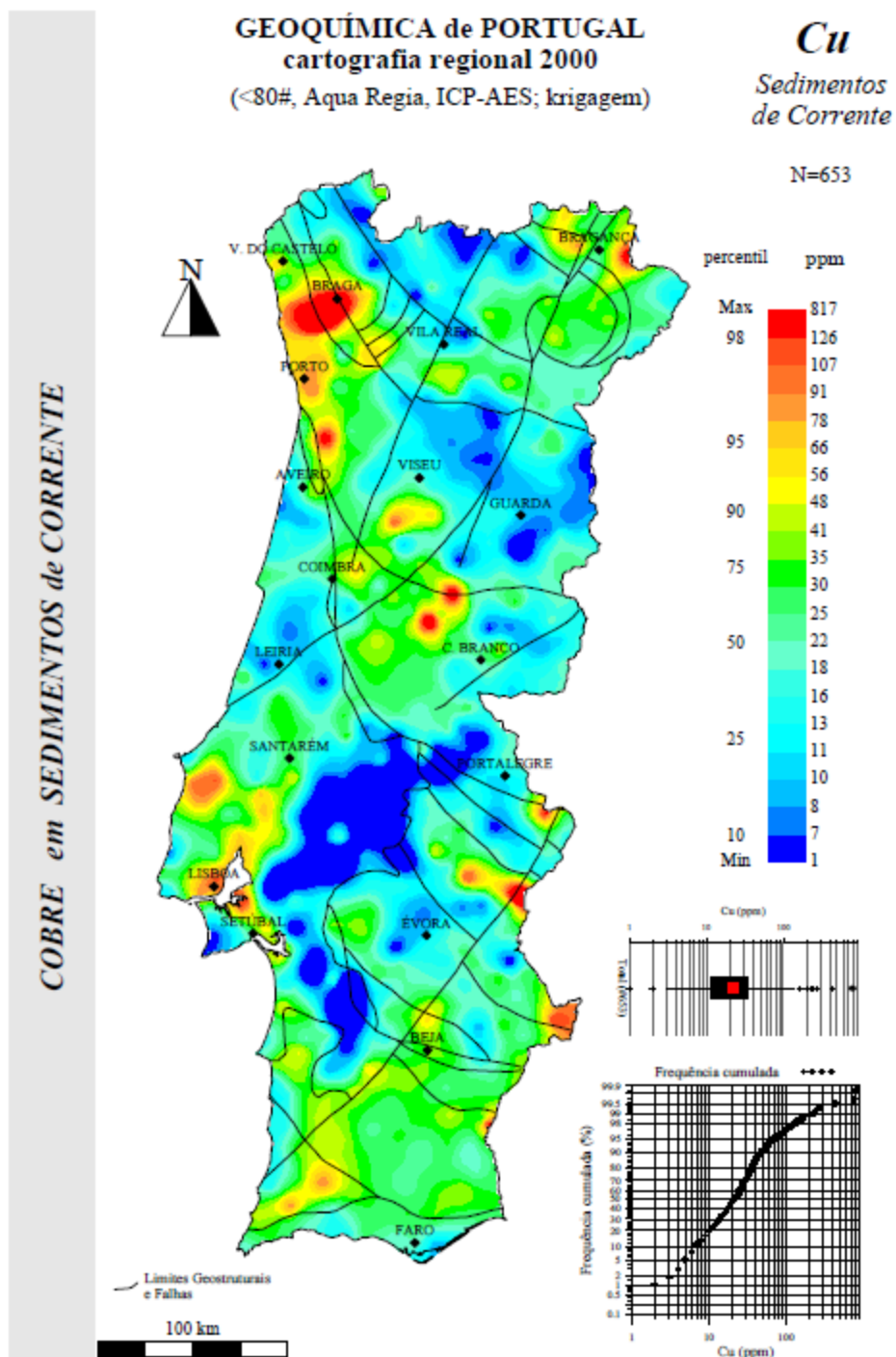


Figura 6.10. Mapa de cobre de Portugal. Atlas Geoquímico de Portugal (Ferreira, 2000)

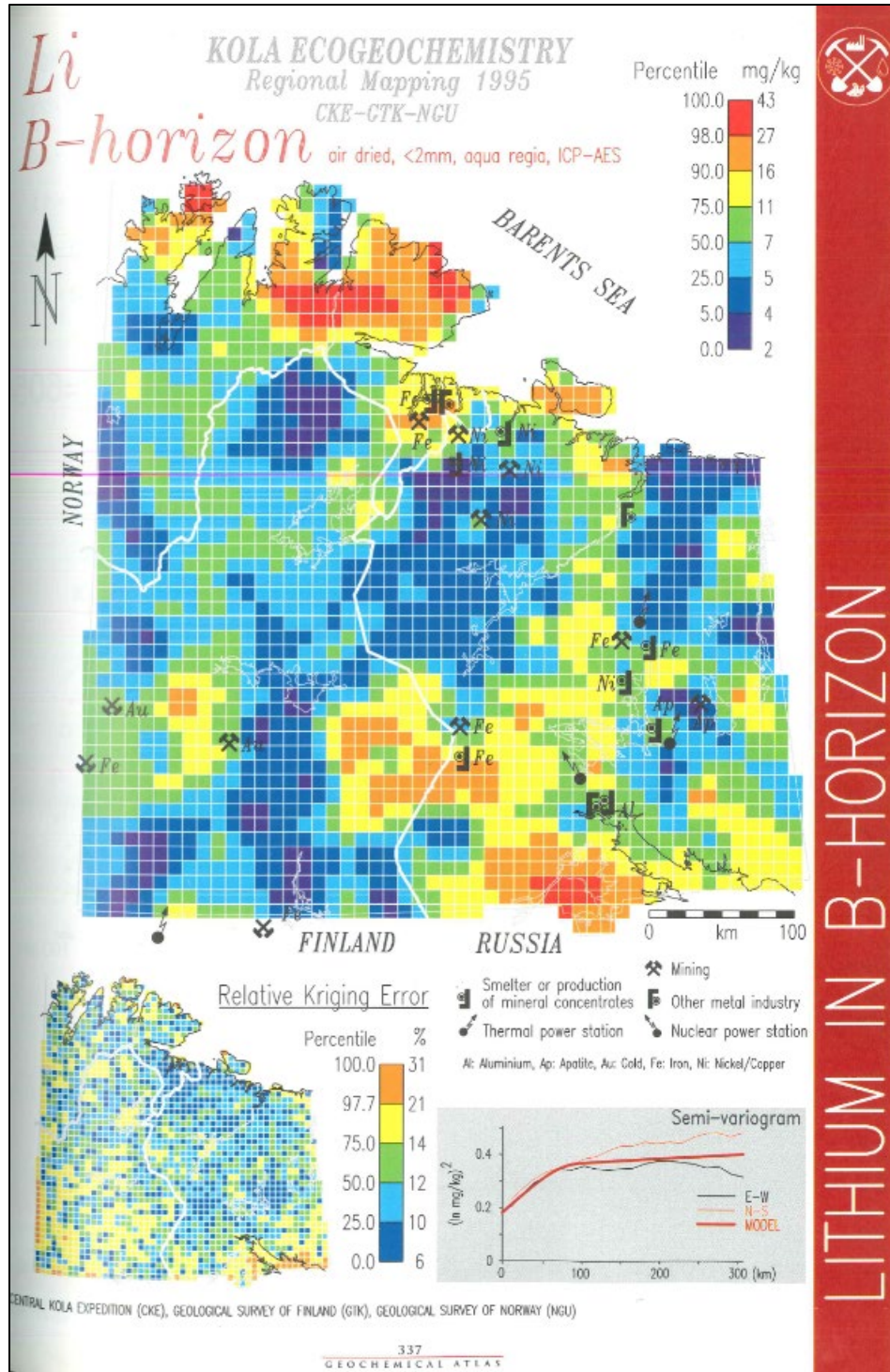


Figura 6.11. Distribución de Litio en suelos. Grilla de colores a partir de métodos de interpolación de datos (Kriging), Reimann et al, 1997.

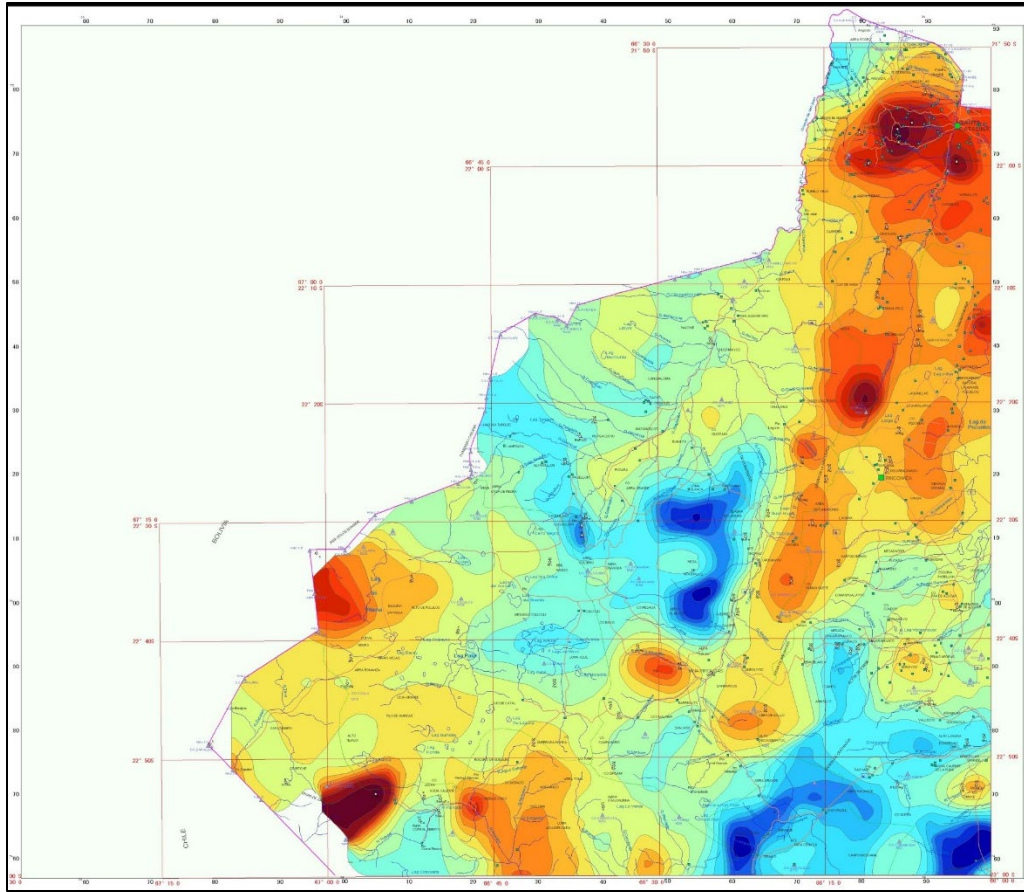


Figura 6.12. Mapa de contornos. Arsénico – Carta Geoquímica Mina Pirquitas, NW de Argentina. Convenio SEGEMAR- Servicio Geológico de la R.P. China

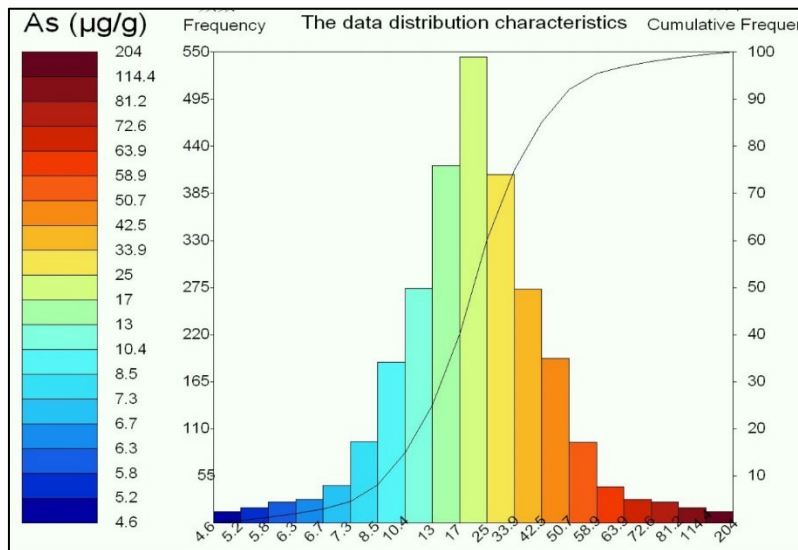


Figura 6.13. Legenda del Mapa de contornos. Las barras en el histograma representan rangos de percentiles: <1,5%, 1,5- 15%, 15- 25%, 25- 75%, 75- 85%, 85- 95%, 95- 98,5% y >98,5%.

Tanto los mapas de representación puntual como los producidos por interpolación de datos pueden contar con información geoquímica complementaria al mapa y sus referencias: el *Histograma* ó gráfico de distribución de frecuencias (más su curva normal ó de frecuencia acumulada) y el *Box Plot* (ó Diagrama de cajas) son los gráficos del EDA (Exploratory Data Analysis, Grunsky, 2010) que dan cuenta del tipo de distribución de frecuencias (normal, sesgada, bimodal, etc.), de la presencia de outliers, de la frecuencia de los datos bajo el límite de detección (censored data), etc., (Figuras 6.14, 6.18, 6.20). Cuadros con estadística básica también son importantes (Fig. 6.15).

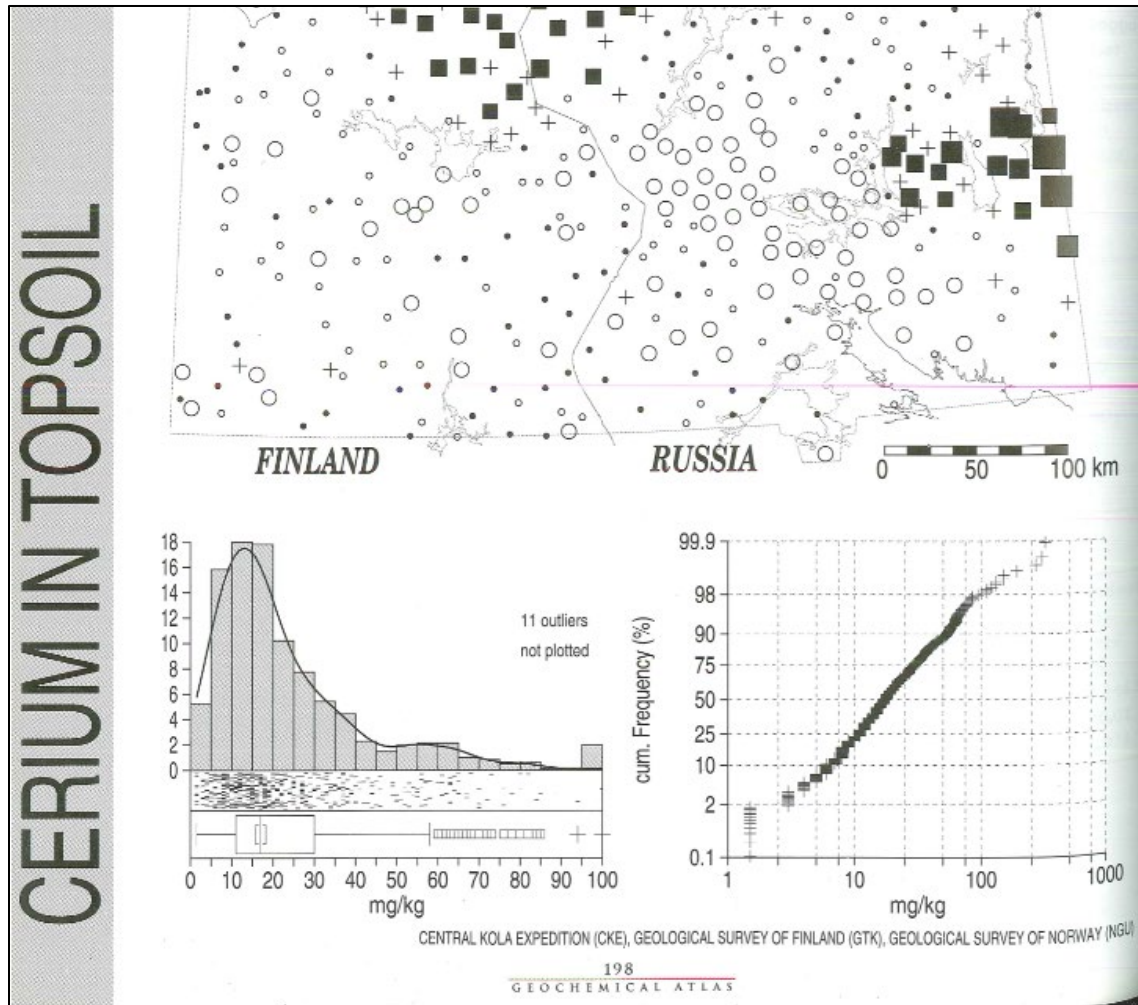


Figura 6.14. Detalle del Histograma, Gráfico de densidad y Diagrama de cajas (Box Plot); a la derecha, abajo, gráfico de frecuencia acumulada. Atlas Geoquímico Ambiental de la región de Barents Central.

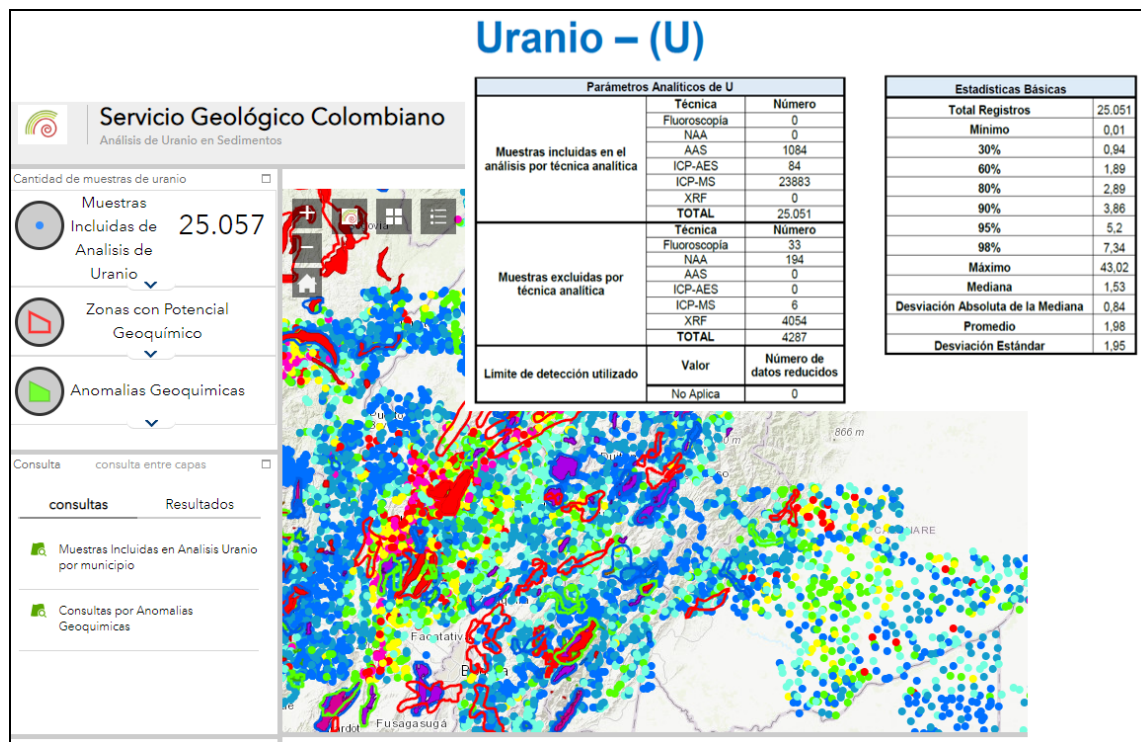


Figura 6.15. Mapa de distribución geográfica y de anomalías de Uranio. Detalle de la información disponible que incluye estadísticas básicas. Portal Web Servicio Geológico Colombiano

El mapa geoquímico debe brindar información sobre el medio de muestreo (sedimento de corriente, suelo superficial, etc.), las unidades de medición (ppm, %, ppb), la fracción analizada, y sería recomendable, de forma complementaria el tipo de procesamiento de la muestra (método de dilución o ataque, pulverización) y el método analítico (Fig. 6.6, 6.10 y 6.11), aunque naturalmente esta toda esta información se encuentre también desarrollada en la memoria o texto del estudio. En términos generales, el mapa geoquímico contiene toda la información objetiva del diseño y de los resultados obtenidos.

6.2 Mapas multielementales ó multivariados.

La variable a representar en un mapa geoquímico puede ser entonces de un elemento o especie química determinada así como también del producto de la suma de variables normalizadas, inclusive ponderadas, como por ejemplo Índices de Mineralización; también pueden representar *scores* de Factores o de Componentes Principales producto del análisis estadístico multivariado, entre otros. La definición de áreas geoquímicas anómalas a través de la comparación de Índices de Mineralización con Factores de mineralización puede resultar de gran utilidad en cartografía metalogenética regional (Fig. 6.16), así como también pueden reflejar procesos de contaminación antrópica también en escala regional.

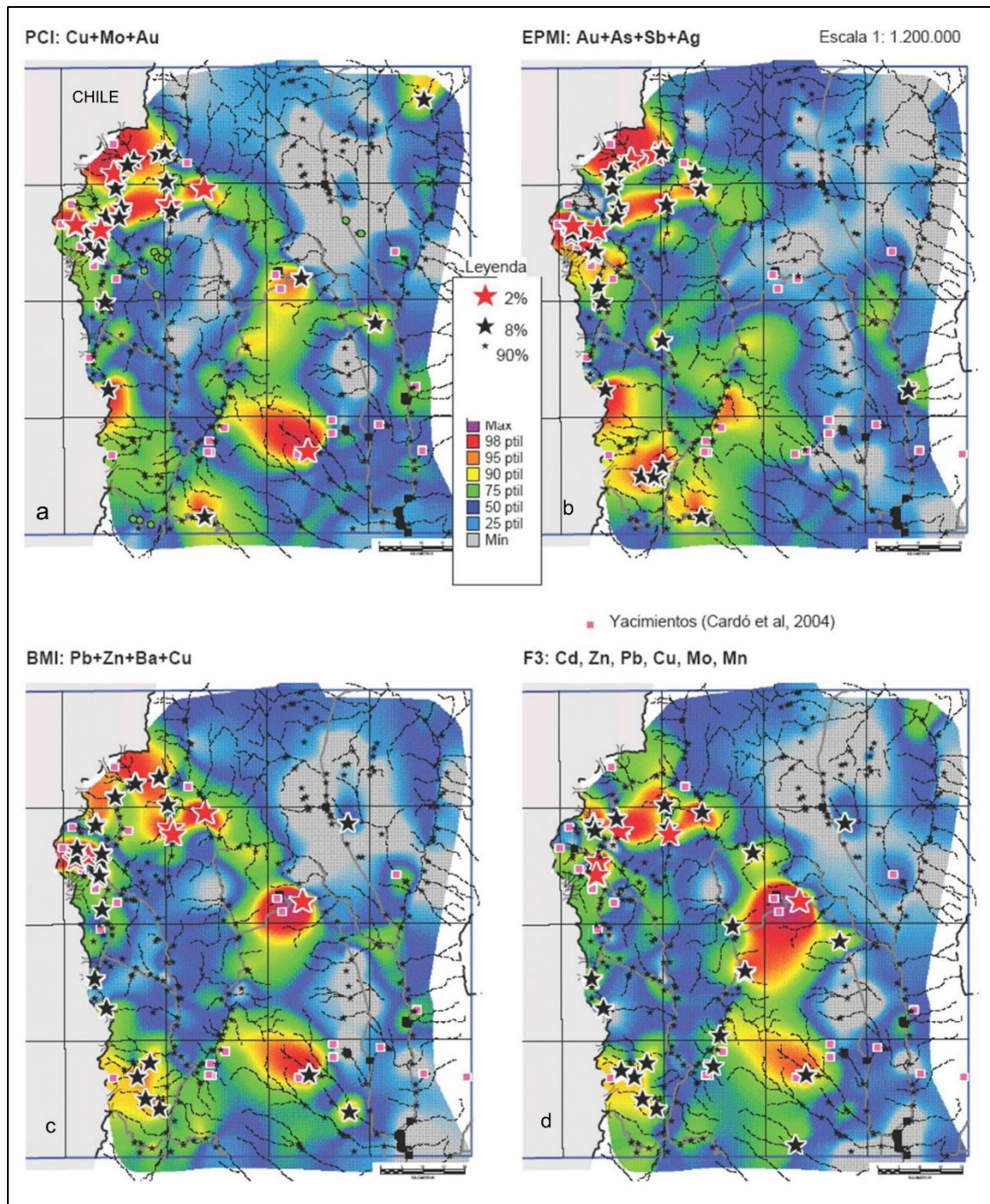


Figura 6.16. Representación en grilla de colores y puntual por rango de percentiles. Comparación de áreas geoquímicas anómalas a través de *Índices de Mineralización*: a) pórfiros de cobre (*PCI*), b) epitermales preciosos (*EPMI*) y c) metales base (*BMI*) con el factor *F3* (d) interpretado como de mineralización. Carta Minero-Metalogenética Malimán (1:250.000), San Juan, Rep. Argentina. SEGEMAR (Turel, 2009)

Distintas representaciones gráficas fueron realizadas por el Servicio Geológico de Brasil sobre datos del Proyecto Mapeo Geoquímico del Cuadrilátero Ferrífero y su Entorno (Larizzatti *et al.*, 2014). Notar la

correspondencia de la distribución geográfica de Au entre el mapa de cuencas de drenaje, la representación puntal y los datos interpolados (Fig. 6.17 y 6.18).

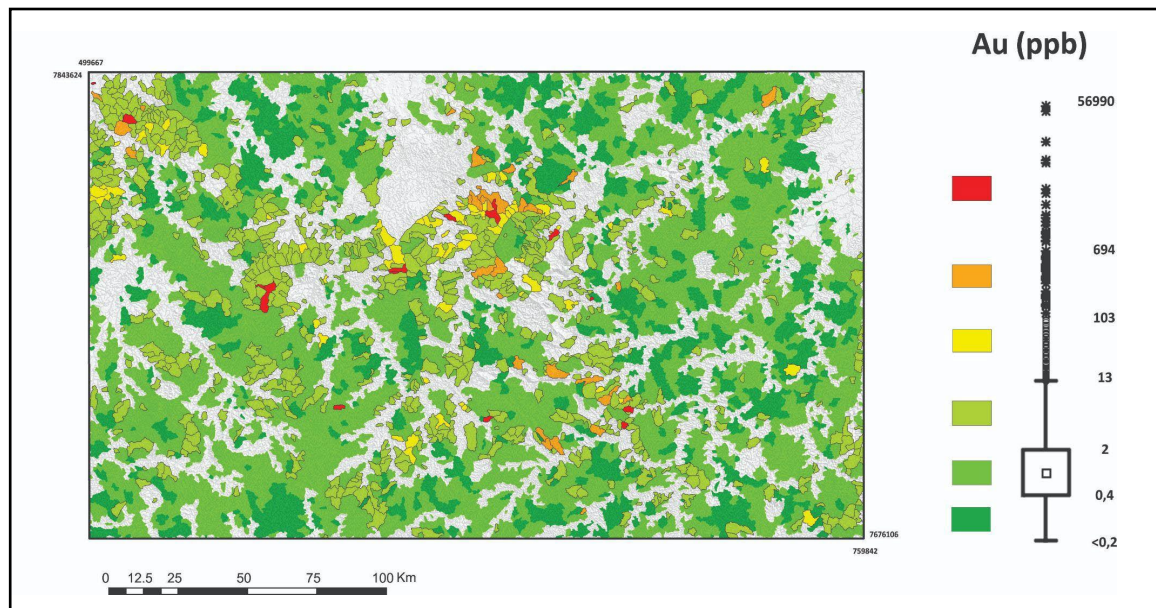


Figura 6.17. Mapa geoquímico de sedimentos activos de corriente (fracción <80#). Representación de la distribución de las concentraciones de oro (Au) a través de cuencas de drenaje (Servicio Geológico de Brasil). Cuadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil

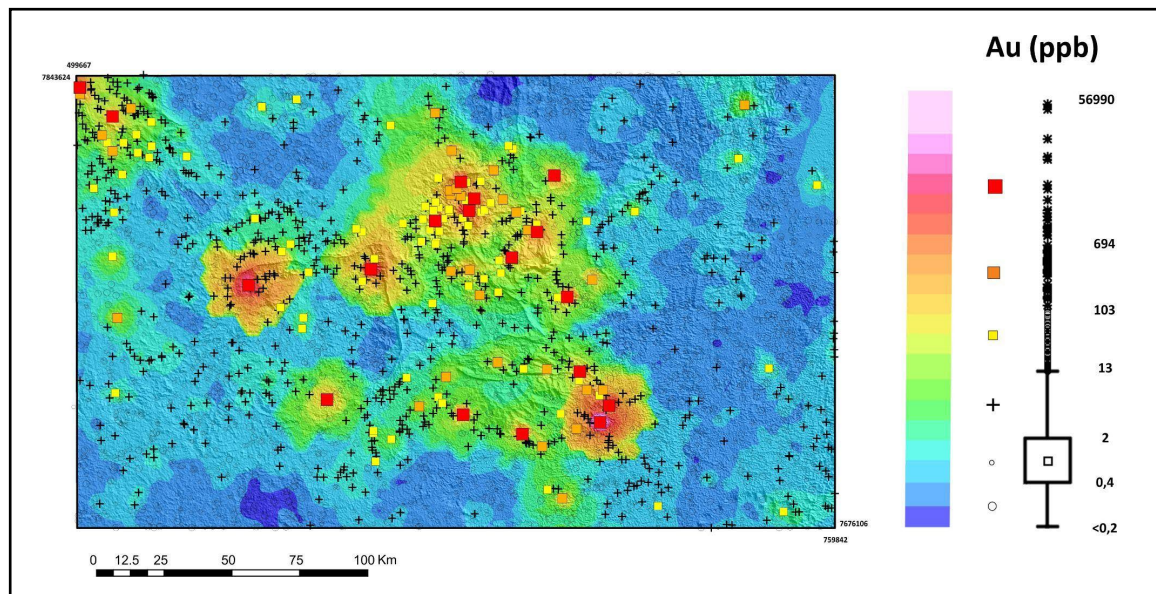


Figura 6.18. Sobre los mismos datos utilizados en la Figura 16- representados de forma puntal e interpolados a través del método IDW, el cual asigna pesos ponderados a los puntos muestreados, de acuerdo a valores encontrados en puntos vecinos

Los mapas geoquímicos de las Figuras 6.19 y 6.20 fueron generados a partir de un estudio multivariado (Análisis de Componentes Principales- *PCA* por sus siglas en inglés), donde se encontró la firma geoquímica dada por la asociación de valores altamente positivos de [Sb-As-Au] y valores altamente negativos de [Ti-Nb-Ga-Sc-Sn] en el Factor 3. Notar la correspondencia y la facilidad en la visualización de las abundancias entre la representación en cuencas de drenaje (Figura 6.19), con datos puntuales e interpolados por IDW (Fig. 6.20).

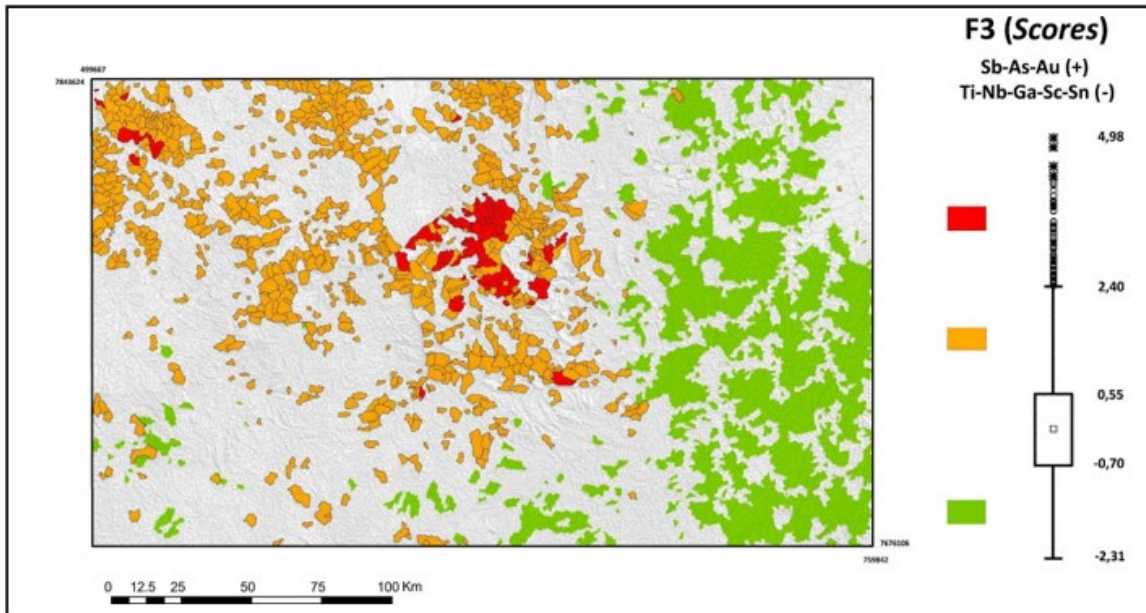


Figura 6.19. Mapa de distribución de los *scores* del Componente Principal 3 (F3) para sedimentos activos de corriente (<80#) compuesto por altos valores de [Sb-As-Au] y bajos valores de [Ti-Nb-Ga-Sc-Sn]. Representación a través de las cuencas de drenaje

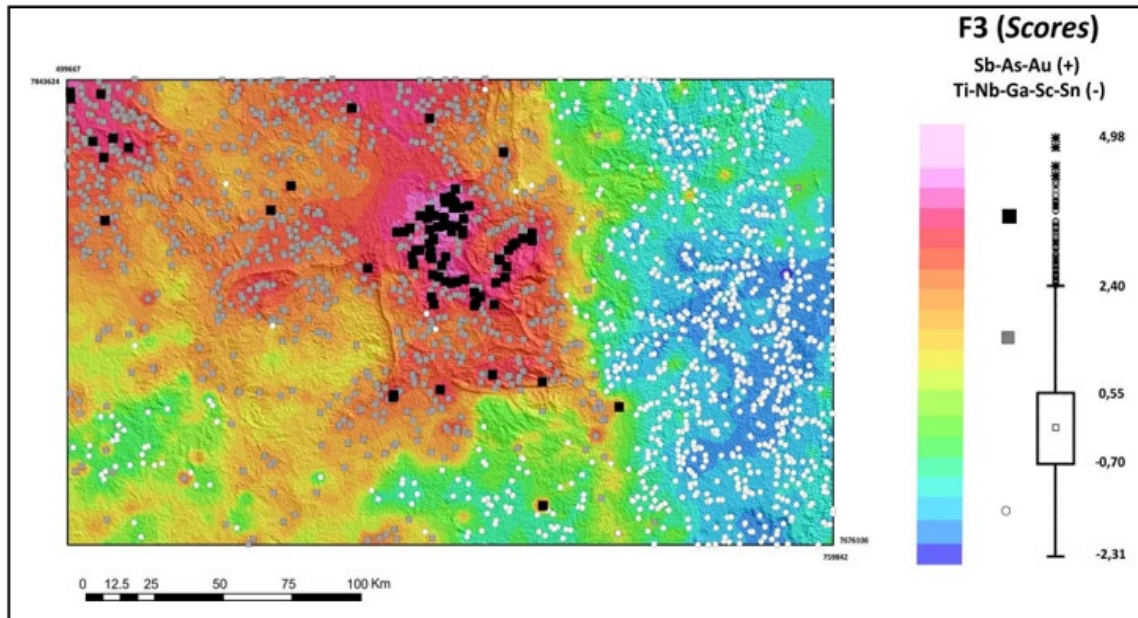


Figura 6.20. La Componente Principal (F3) es representada en forma de puntos, que además son interpolados a través del método IDW, que asigna pesos ponderados a los puntos muestreados de acuerdo a valores encontrados en puntos vecinos

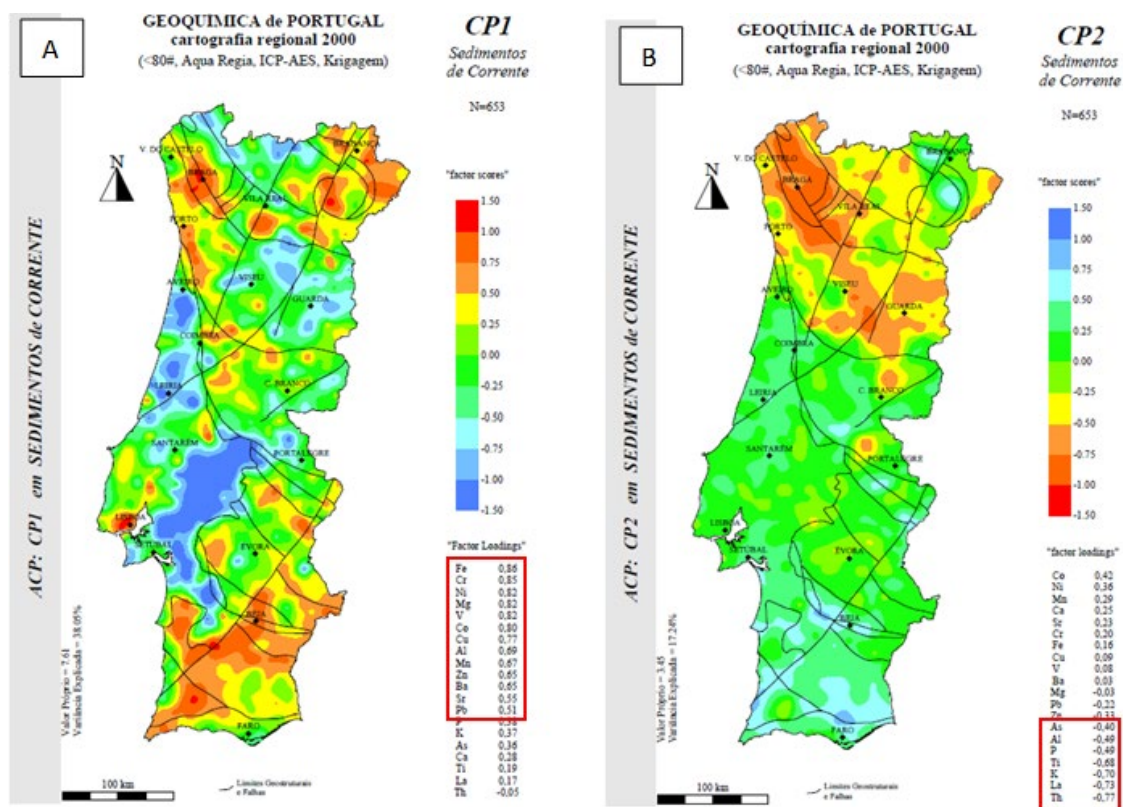


Figura 6.21. Las Componentes Principales (CP1 e CP2) interpolados a través del método *kriging* isotrópico. En el mapa A, los elementos químicos agregados representan los metasedimentos. En el mapa B los elementos químicos representan las rocas granitoides (Ferreira, 2000)

6.3 Interpolación de datos

La interpolación de datos es una técnica que predice valores para las celdas de un archivo ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos (de muestras geoquímicas, por ejemplo). Puede utilizarse para predecir valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, a partir de archivos georreferenciados. La visualización de la distribución de abundancias de los elementos químicos y/o de cualquier variable (índices ó factores de mineralización, suma ó cociente de elementos, etc.), es facilitada a partir de las grillas generadas por técnicas de interpolación que suele complementarse con la representación puntual del dato (Fig. 6.16, 6.18 y 6.20). De esta manera, y a través de la generación de mapas de contornos, se pueden representar áreas anómalas con archivos vectoriales, por ejemplo a través del recorte del contorno del 90, 95, 98 percentil (ó el definido como umbral) y el valor máximo (Fig. 6.22). Es de gran utilidad como capa de información para trabajos exploratorio- prospectivos en entornos SIG (sistemas geográficos de información).

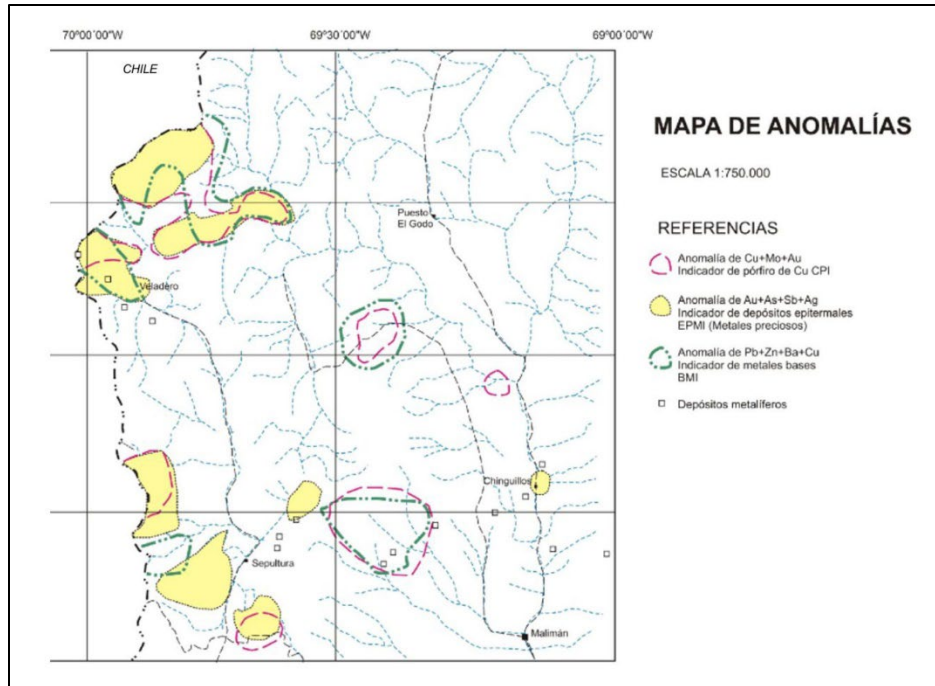


Figura 6.22. Anomalías geoquímicas regionales definidas a partir del mapa de contornos de PCI, EPMI y BMI (90 percentil- valor máximo). Índices de mineralización a partir de la Fig. 6.16. Carta Minero- Metalogenética Malimán, San Juan- Argentina. SEGEMAR

Entre los métodos de interpolación más frecuentemente usados en geoquímica se encuentran:

-*IDW*. Interpola una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de distancia inversa ponderada. La influencia de un punto de entrada sobre un valor interpolado es isotrópica (Fig. 6.18 y 6.20)

-*Kriging*. El tipo de *kriging* universal presupone que hay un componente estructural presente y que la tendencia local varía de una ubicación a otra; esta dependencia entre valores de diferentes sitios es modelada por la función variograma (Fig. 6.10 y 6.11), análisis que previamente requiere estudiar la distribución de cada elemento.

-*Natural Neighbor Interpolation* ó Vecino natural. Interpola una superficie de ráster a partir de puntos utilizando una técnica de vecinos naturales. El algoritmo utilizado halla el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (polígonos de Voronoi adyacentes). No infiere tendencias, no produce picos ni depresiones que no estén ya representados por las muestras de entrada (Fig. 6.18).

Capítulo 7 - Informe geoquímico, gestión de la información geoquímica, almacenamiento y manejo de información

7.1. Informe geoquímico

Los pasos generales de un informe geoquímico siempre comienzan con una introducción que incluye el trabajo previo en la región, la caracterización geológica de la región y lugar donde se realiza el estudio. A continuación se presenta la metodología utilizada para el mismo estudio, ya sea planificación de muestreo, muestreo, tratamiento físico de las muestras y su empaque para envío al laboratorio. Se sigue la metodología, o metodologías de análisis químico que se utilizaron para el estudio, análisis y también el control de calidad de todo este proceso desde la toma de muestras hasta el análisis químico, uso de estándares, réplicas y duplicados de campo y su necesaria interpretación. Luego se presenta el procesamiento de los datos del levantamiento geoquímico, que requiere un enfoque sistemático para interpretar de manera efectiva y significativa. Los problemas comúnmente asociados con los datos geoquímicos incluyen el cierre del análisis, los valores faltantes, el aplanamiento de diferentes conjuntos de datos y el diseño de muestras espaciales adecuado también deben ser explicados aquí. Los desarrollos recientes en el análisis multivariante avanzado, el análisis geoespacial y el mapeo brindan un marco efectivo para analizar conjuntos de datos geoquímicos y facilitar su interpretación. Los procesos geoquímicos y geológicos a menudo se pueden reconocer mediante el uso de procedimientos de datos exploratorios, como: análisis factorial, análisis de componentes principales y análisis de correspondencia. Los procedimientos de clasificación y predicción se pueden utilizar para confirmar la variabilidad litológica, los procesos de alteración y la mineralización, y además estos facilitan la interpretación espacial del estudio geoquímico. A continuación, la interpretación y discusión de los resultados tiene en cuenta el medio geológico, la escala de trabajo, ya sea continental, regional/nacional o local, por lo que la interpretación geológico-geoquímica varía entre la distribución de los elementos químicos durante ciertos eventos tectónicos de los continentes y la presencia de alteración hidrotermal en una roca. En seguida se presenta una conclusión del estudio, referencias bibliográficas, anexos de datos brutos y mapas. Las diferencias entre los distintos tipos de informes de estudio radican en el objetivo y el público que leerá el informe, por lo que en este capítulo hemos dividido estos informes en tres: Exploración mineral, Mapeo ó relevamiento regional y Diagnóstico ambiental.

7.1.1. Informe de exploración mineral

Los informes con objetivos de exploración mineral tienen implicaciones en términos de viabilidad económica y pueden llevar a los operadores a inversiones significativas en un área determinada, por lo que toda la información contenida en ellos debe ser verificable. Los reguladores de todo el mundo requieren que las empresas públicas que invierten en proyectos minerales divulguen información técnica específica. Para aumentar la relevancia, precisión y transparencia de los informes a nivel mundial, el Comité de Normas Internacionales para la Información de Reservas Minerales (CRIRSCO) ha desarrollado una plantilla de informes internacionales. Esto cubre, pero no reemplaza, las pautas de informes de los

miembros de CRIRSCO, las organizaciones nacionales de informes de reservas minerales de Australia, Canadá, EE. UU., Chile, Sudáfrica, Reino Unido, Irlanda y Europa Occidental.

En estos informes, el oficial informante debe demostrar sus calificaciones para preparar informes técnicos independientes en muchas jurisdicciones internacionales. Mediante la evaluación de los factores materiales que influyen en el rendimiento y el uso de procedimientos estructurados de validación y verificación para confirmar la integridad de los datos, desarrollan informes fiables sobre los recursos minerales. Estos informes deben ser muy claros con respecto a la viabilidad económica o la necesidad de una mayor inversión en prospección de minerales, teniendo en cuenta los estándares locales e internacionales en todas las etapas de exploración e minería.

Ejemplos de códigos de plantillas de informes nacionales e internacionales y lo que deben contener son los siguientes: Europa – PERC; Australia y Asia – JORC; Canadá - National Instrument 43-101; Sudáfrica – SAMREC; Estados Unidos - Guía SME.

El informe presentado con motivo de la prospección mineral de una región por el Servicio Geológico debe ser independiente y respetar los principios de sustentabilidad. Si el informe tiene por objeto la prospección estratégica, es decir regional o local, con miras a definir los contenidos del fondo, anomalías y áreas mineralizadas, el relator deberá presentar datos y mapas y hacer interpretaciones basadas en resultados sólo visibles en los mapas o datos estadísticos o brutos, deja tus interpretaciones personales para comunicaciones orales o artículos.

Si el informe corresponde a estudios más detallados de un área mineralizada comprobada, se deberán seguir, en lo posible, las recomendaciones de los modelos internacionales de reporte, así como las que correspondan a la estrategia nacional de recursos minerales de un determinado país. El ponente, perteneciente a un Servicio Geológico, deberá indicar los posibles recursos de las principales materias primas y también de todos los subproductos con contenidos potencialmente aprovechables. Esta recomendación tiene como objetivo asesorar sobre el buen uso de todo el recurso y así promover la mayor vida posible de la explotación. Este informe de un Servicio Geológico en proceso de conclusión debe contener recomendaciones que tomen en cuenta factores sociales, generadores de empleo y ambientales, con el fin de reducir los impactos durante la explotación. Estas recomendaciones, en línea con las establecidas por el regulador nacional, pueden orientar al operador en las siguientes fases del proyecto minero.

7.1.2. Informe de mapeo ó relevamiento regional

Los pasos generales de un informe geoquímico de mapeo regional son similares en esencia en los primeros capítulos a los otros objetivos, dando gran importancia a la escala de trabajo, planificación del muestreo y descripción de la geología regional de acuerdo a la escala de trabajo que se pretende estudiar. En las metodologías, son importantes os diferentes conjuntos de datos utilizados, si no se está trabajando con una sola campaña de datos, porque para una interpretación conjunta será necesario describir en este informe en detalle el tipo de nivelación de datos y si esta nivelación fue exitosa. En la interpretación, las características espaciales más importantes y su relación con la geología, la topografía y eventualmente la influencia de la acción humana deben resaltarse en cada mapa de uno o varios elementos.

En este caso, es muy importante seguir las orientaciones de los informes a que se refieren los manuales internacionales de cartografía geoquímica para estandarizar progresivamente los procedimientos entre los países de la ASGMI, de manera similar a otras organizaciones y países del mundo (Demetriades et al., 2022).

7.1.3. Informe de diagnóstico ambiental

Los estudios más frecuentes se agrupan en dos tipos de objetivos, la contaminación urbana o industrial y la contaminación provocada por la actividad minera. Sin embargo, es más frecuente y pertinente un diagnóstico ambiental realizado por un equipo de un Servicio Geológico estar relacionado con la contaminación provocada por la actividad minera. Las diferencias en la presentación, interpretación y presentación de los resultados obtenidos radican fundamentalmente en el tipo de nivel de referencia, usualmente definido en base al uso de suelo: urbano, agrícola, industrial, etc. Es decir, en el caso del diagnóstico ambiental urbano y/o industrial, el informe debe tener en cuenta la legislación ambiental del país, los niveles de contaminación establecidos en dicha legislación y la interpretación e informe debe estar muy enfocado a estos aspectos.

Si el diagnóstico ambiental se realiza en un área minera, además de la legislación, se trata de un área anómala en ciertos elementos químicos removilizados y probablemente incrementados sus contenidos debido a la actividad minera; en este caso, se debe tener en cuenta el informe e interpretación previo de exploración y evaluación del recurso (si lo hubiera) para comprender mejor qué contaminación será relevante. El estudio debe incluir la evaluación de las áreas de desechos mineros (en términos de contenidos de elementos químicos y volumen) y también tener un área “blanca” para comparar con los contenidos de fondo regionales, que preferiblemente deben estar en el mismo ambiente geológico, pero no perturbadas por la actividad minera.

7.2. Gestión de la información geoquímica, almacenamiento y manejo de información

El almacenamiento y manejo de la información geoquímica recolectada en un proyecto de geoquímica aplicada constituye una parte esencial de este; si realizamos un correcto almacenamiento de la información, con unos campos mínimos y comunes entre los datos, es posible su utilización para trabajo futuros, ya sea en reprocesamiento de información, integración de datos (utilizar diferentes data set), procesamiento de nivelación “*leveling*”, en estudios de líneas base entre otros; en este sentido este capítulo pretende dar unas pautas mínimas en el almacenamiento y manejo de información geoquímica, partiendo del concepto de la integración del dato.

7.2.1 Almacenamiento de información geoquímica.

En relación con el almacenamiento de información este debe estar definido desde el inicio del proyecto, y se encuentra estrechamente relacionado con la toma de información en campo o terreno; lo más recomendado para evitar vacíos de información es la utilización de formatos de captura de información, estos deberían incluir no solo la información necesaria para el desarrollo del proyecto que se esté realizando, sino información que pueda ser útil para otras aplicaciones; un ejemplo de estos se da en algunos proyectos de exploración para recursos minerales, los cuales no tienen en cuenta mediciones como PH o conductividad, y de igual manera en algunos proyectos para estudios ambientales, donde por ejemplo no se describen la fracciones de minerales pesados, información que puede ser útil en un futuro, reducir los costos de un re muestreo o visitas posteriores.

7.2.1.1 Formato de captura de información.

Es de recordar que cada proyecto define el formato de captura de información según su necesidad y recursos económicos, lo que no es recomendado es la no utilización de un formato. A grandes rasgos un formato básico debe incluir, el número de la muestra, la ubicación donde se especifique claramente el sistema de coordenadas utilizado (también se acostumbra incluir una referencia geográfica como nombre la cuenca, población, país, etc.), el tipo de muestra o matriz recolectado, el nombre del proyecto, nombre de quien tomo la muestra, escala de trabajo y si la muestra es para control de calidad (tipo de muestra para control de calidad), también es recomendable realizar una descripción del sitio de muestreo y de posibles fuentes de contaminación. Con esta información básica es posible hacer un correcto manejo de la información y llevar una trazabilidad de la muestra y de sus posteriores análisis químicos.

Posterior a esta información base y según las necesidades y tipo de muestras que sean utilizados en los estudios geoquímicos se incluye información relacionada, como pueden ser clima, paisaje, uso del suelo, tamaño de grano para sedimentos, litología aflorante, tipo de muestra de roca, alteraciones, minerales observados, PH, conductividad, materia orgánica, entre otros.

Ejemplo de Colombia

Na Figura 7.2.1 muestra la ficha de campo utilizada por el Servicio Geológico de Colombia.

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO		CAPTURA DE INFORMACIÓN EN CAMPO PARA MUESTREO DE SEDIMENTOS ACTIVOS DE CORRIENTE		VERSIÓN 4
			CÓDIGO: F-SUB-REC-003	
			Página 1_ de 2_	
1. INFORMACION GENERAL				
No. Id muestra	Subtipo muestra	<input type="checkbox"/> Activo fino <input type="checkbox"/> Fino de lecho seco <input type="checkbox"/> Suspensión	Control Calidad	<input type="checkbox"/> Original <input type="checkbox"/> Duplicado* <input type="checkbox"/> Remuestreo <input type="checkbox"/> Estandar <input type="checkbox"/> Blanco
No. Plancha IGAC	Responsable			Escala trabajo
Fecha (d/m/a)	Entidad			<input type="checkbox"/> 1:500.000 <input type="checkbox"/> 1:100.000 <input type="checkbox"/> 1:50.000 <input type="checkbox"/> 1:25.000 <input type="checkbox"/> Otra:
Proyecto				*Muestra Padre
2. LOCALIZACION DEL PUNTO DE MUESTREO (* campo obligatorios)				
Departamento	Coordenadas Geográficas	LATITUD * ' "	Método localización	<input type="checkbox"/> GPS <input type="checkbox"/> Plancha <input type="checkbox"/> Otro: _____
Municipio	Coordenadas	LONGITUD * ' "	Precisión GPS:	<input type="checkbox"/> Datum Bogotá <input type="checkbox"/> Datum Magna
Vereda	Coordenadas Planas	<u>NORTE</u>	Altitud (m)	<input type="checkbox"/> ± _____
Cuenca Principal (Quebrada, Río)	Coordenadas Planas	<u>ESTE</u>	Altitud Medida con	<input type="checkbox"/> GPS <input type="checkbox"/> Altimetro <input type="checkbox"/> Plancha
Cuenca Muestreada (Caño, Lago, Quebrada, Río)	Sistema Coordenadas	<input type="checkbox"/> Datum Bogotá <input type="checkbox"/> Datum Magna	Cantidad Fotos (#):	_____
	Origen coordenadas:	_____	Código Fotos:	_____

Figura 7.2.1. Imagen tomada del formato de captura de información en campo para muestreo de sedimentos activos de corriente utilizado por el SGC; en la imagen, campos 1 y 2 de información básica de la muestra.

Algunos ejemplos de formatos de captura de información se pueden obtener de los diferentes servicios geológicos pertenecientes a ASGMI, para el caso del Servicio geológico colombiano, estos han sido organizado por tipo de muestra e incluye; captura de información en campo para muestreo de sedimentos activos de corriente (Figura 7.2.2), captura de información en campo para muestreo de rocas, captura de información en campo para muestreo de sedimentos de llanura de inundación, captura de información en campo para muestreo de concentrados de batea, entre otros.

5. DATOS DE CAMPO PARA SEDIMENTOS ACTIVOS DE CORRIENTE (Finos)

5.1 Descripción del sitio
 Abierto
 Abierto influencia de coluvión
 Abierto influencia de tributario
 Angosto
 Angosto influencia de coluvión
 Angosto influencia de tributario
 Influencia de coluvión
 Influencia de tributario

5.2 Tipo de cuerpo de agua
 Agua estancada
 Caño
 Quebrada
 Río

5.3 Profundidad drenaje (m) _____

5.4 Ancho drenaje (m) _____

5.5 Tamaño cuenca (km²) _____

Influencia
 Influencia de Coluvión
 Influencia de Tributario
 Sin influencia

5.6 Nivel de Caudal
 Seco
 Bajo
 Normal
 Crecido
 Intermitente

5.7 Velocidad del agua
 Estacionaria
 Lenta
 Moderada
 Rápida
 Sin flujo

5.8 Pendiente del lecho
 <5
 5-20
 20-40
 >40

5.9 Punto de muestreo
 Banco
 Playa
 Cabeza de barra
 Pie de barra
 Remolino
 Ripple

5.10 Precipitados
 AlOX
 CaCO3
 CuOX
 FeOX
 MnOX
 Sin precipitados

5.11 Parámetros físico-químicos del agua
 pH _____ T°C _____

5.12 Uso de floculante
 Si
 No

5.13 Tipo de floculante
 Orgánico
 Inorgánico

5.14 Información floculante
 Nombre _____
 Concentración _____
 Cantidad (mL) _____

5.15 Tamiz utilizado (# malla): _____

5.16 No. de Submuestras _____

5.17 Intervalo Sub-muestras (m) _____

5.18 Color predominante sedimento _____

5.19 Contenido orgánico
 Alto
 Medio
 Bajo

5.20 Partícula predominante lecho

Granulometría	%	Composición	%	Forma

Partícula **Tamaño**
 Bloques >256 mm
 Cantos 16-256 mm
 Gujarros 4-16 mm
 Gránulo 2-16 mm
 Arena 2 - 0.063 mm
 Lodo <0.063 mm

Figura 7.2.2. Imagen tomada del formato de captura de información en campo para muestreo de sedimentos activos de corriente utilizado por el SGC; en la imagen, el campos 5 datos de campo para sedimentos activos de corriente.

Ejemplo de Argentina

MUESTRA N°. 18445

Proyecto: _____ Fecha: _____
 Muestreador: _____

DATOS DE UBICACION
 Provincia: _____ GPS: Si/No
 Y/L: _____ X/LO: _____ Altura: _____
 Unidades: Grados/metros Faja Gauss Krüger: _____
 Hoja 1:250,000: _____ Fotomosaico: _____

Nombre del sitio: _____

CARACTERÍSTICA DE LA MUESTRA
 Medio del muestreo: ROCA SUELO SEDIMENTO AGUA
 Tipo de muestra: SIMPLE COMPUESTA DUPLICADO (CAMPO/LAB)
 CONTROL EST. ORIENTACION PATRÓN BLANCO OTRO
 Patrón/blanco/duplicado N°.: _____
 Contaminación: NINGUNA DÉBIL MODERADA FUERTE
 Tipo de contaminación: POBLACION AGRICULTURA MINERIA INDUSTRIA OTRA

DATOS DEL SITIO
 Sustrato: Litología Tipo: _____ (débil/mod./fuerte)
 Alteración Tipo: _____ (débil/mod./fuerte)
 Mineralización Tipo: _____ (débil/mod./fuerte)
 Cubierta: RESIDUAL ALUVIAL COLUVIAL EOLICA GLACIAR OTRA

ROCA
 Tipo: SIMPLE COMPUESTA ESQUIRRA CANAleta OTRA
 Área/Longitud del muestreo: _____
 Fuente: AFLORAMIENTO CLASTOS ESCOMBRERA SOMBRERO DE HIERRO
 VETA FRACTURA OTRA
 Litología: _____ Color: _____ (débil/mod./fuerte)
 Alteración: _____ (débil/mod./fuerte)
 Mineralización: _____ (débil/mod./fuerte)
 Fracturación: NINGUNA MENOR MODERADA ALTA BRECHA
 Meteorización: NINGUNA DÉBIL MODERADA FUERTE SAPROLITO

AGUA
 Volumen _____ Filtrado 0.45 µ Si/No Alícuotas: SIN ACID./ACIDULADA
 pH _____ Temperatura _____ °C Color _____ Conductividad _____

SEDIMENTO DE CORRIENTE
 Tipo de muestra: NORMAL CONCENTRADO CAUCO: ACTIVO INACTIVO
 Tamizado en el terreno: SI/NO Malla: _____

Sitio: A B C D

Curso de agua de orden: 1 2 3 Otro: _____
 Ancho (m): <2 2-5 5-10 10-20 >20

Pendiente: PLANA LEVE MODERADA ESCARPADA
 Estado del curso de agua: SECO HÚMEDO ESTANCADO LENTO MODERADO RÁPIDO
 Contenido orgánico: NINGUNO MENOR MODERADO ALTO
 Oxidos de superficies: NINGUNO FeOX MnOX AMBOS OTROS:
 Aforamiento de sustrato: NO VISIBLE EN LA LADERA EN EL LECHO OTRAS

Litología observable _____ %
 en los clastos _____ %

SUELO O REGOLITO
 Regolito: RESIDUAL TRANSPORTADO
 Naturaleza EÓLICO COLUVIO ALUVIO
 del material TILL LACUSTRE SAPROLITO
 originario: LATERITA ROCA
 Matriz dominante: HUMUS ARCILLA SUELO
 LIMO ARENA

Color: _____ Profundidad (cm): _____
 Horizonte: A₀ A₁ A₂ B C D
 Humedad: SECO HÚMEDO MOJADO
 Materia orgánica: NINGUNA MENOR MODERADA ALTA
 Pendiente: dirección _____ ángulo _____
 Litología observable _____ %
 en los clastos _____ %

NOTAS

Muestra N°. 18445 Muestra N°. 18445
 IGRM-SEGEMAR IGRM-SEGEMAR

Figura 7.2.3 - Tarjeta de muestreo geoquímico del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Frente y dorso. Datos genéricos del sitio y de la muestra, Roca, Agua, Sedimentos de corriente y Suelo ó regolito. Etiqueta de la muestra por duplicado, bajo línea troquelada

Ejemplo de España

Tubo de canal		Longitud río (km)	Flujo	Nivel del agua	Relieve
Natural			Nulo	Seco	Llano
Forzado		Profund. río (m)	Lento	Bajo	Moderado
Artificial			Moderado	Normal	
			Rápido	Alto	Alto

Cobertura veg.		Granulom. lecho	Granulom. muestra	Color del sedimento	
Si	No	Bloques-grava	Arena	Amarillo	Naranja
		Grava-arena	Arena fina	Azul	Marrón
		Arena-limo	Arcilla	Blanco	Negro
		Arcilla	Turbidez agua	Gris osc.	Rosa
		Pendiente	Transparente	Gris claro	Verde
		Baja	Poca	Crema	Rojo
		Moderada	Moderada	Otro:	
		Pronunciada	Mucha		

Uso del terreno	Litología	Observaciones
Agrícola	R. Graníticas	
Ganadería	R. Volcánicas ácidas	
Semi-urbano	R. Básicas y U.B.	
Sin especificar	R. Carbonatadas	
Vegetación	Argilitas, Arenas	
Viñas	Conglomerados	
Huertas	Esquistos, Neises	
Cereales	Cuarcitas	
Olivo	Recubrimiento	
Prado		
Monte bajo		
Bosque		

Fig. 7.2.4. Imagen de la ficha de campo de uno de los últimos proyectos realizados por el IGME de exploración geoquímica en España.

Ejemplo de Chile

La metodología de captura de información de terreno ha tenido una rápida evolución temporal, desde la clásica libreta de papel, pasando por el robusto notebook de terreno y desembocando en la versatilidad del smartphone.

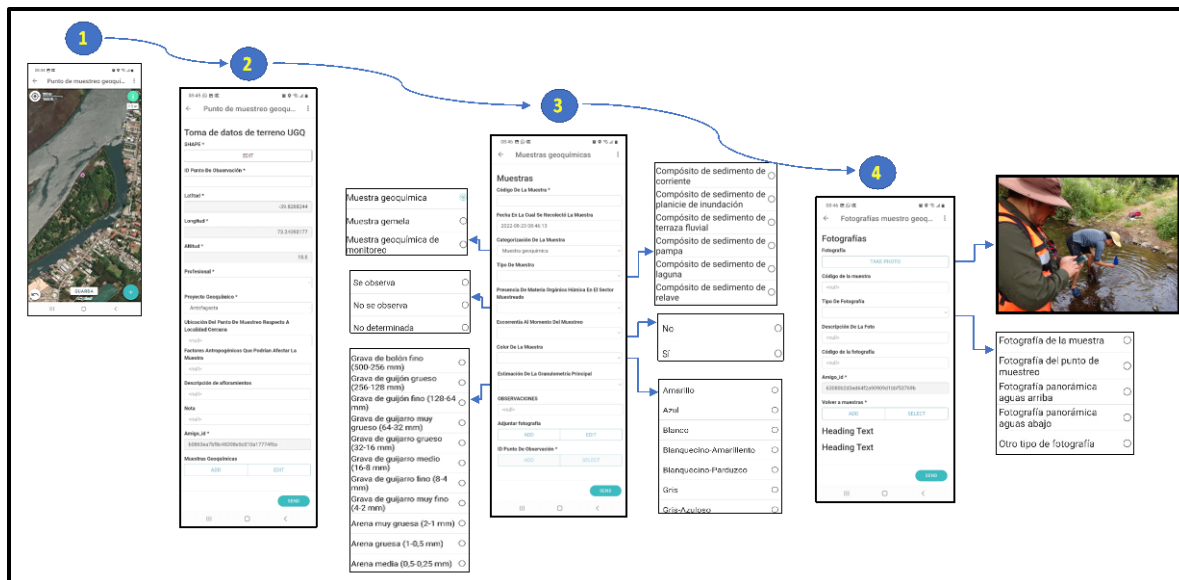


Fig. 7.2.5. - Formulario de levantamiento de datos de terreno mediante smartphones. Incluye las siguientes 4 etapas: 1) Ubicación del punto de muestreo utilizando imágenes satelitales de referencia, localizando el punto (círculo rojo) automáticamente por medio del GPS del smartphone o en forma manual; 2) Formulario de ingreso de información del punto de muestreo, con posibilidad de ingreso de información asociada a muestras recolectadas ("Muestras geoquímicas_ADD"); 3) Formulario de ingreso de información asociada a las muestras recolectadas en el punto de muestreo. Se despliegan listas de validación para cada tipo de información a ser ingresada. Permite el ingreso de fotografías asociadas a cada muestra recolectada ("Adjuntar fotografías_ADD"); 4) Menú para el ingreso de distintos tipos de fotografías para cada muestra.

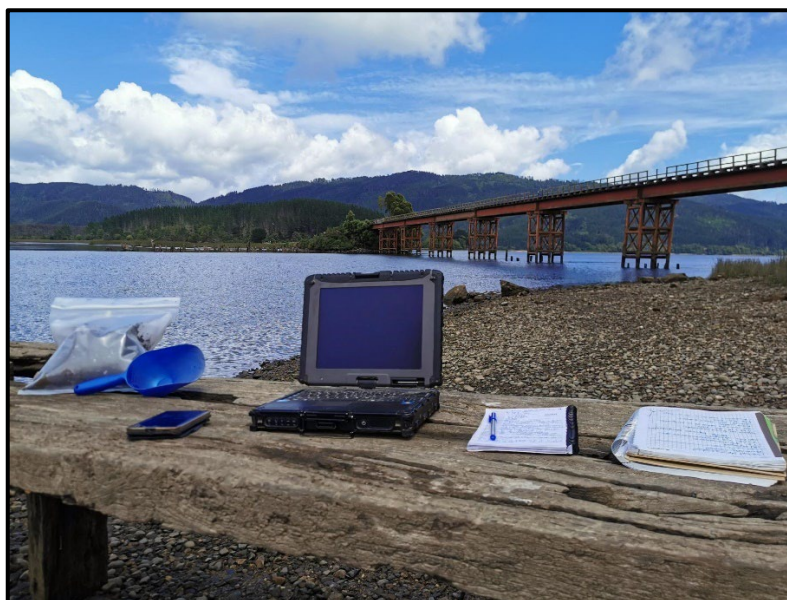



Fig. 7.2.6. - La "evolución" tecnológica en la captura de datos geoquímicos de terreno, del Programa de cartografía Geoquímica de SERNAGEOMIN. Comenzando, de derecha a izquierda, por la importantísima libreta de terreno, seguida por el robusto notebook de terreno y desembocando en el versátil smartphone de la actualidad. Fotografía tomada en el río Nagüilán, por Pablo Oliva, en el contexto de la capacitación en muestreo geoquímico realizada en la cuenca del río Valdivia, Región de Los Ríos, sur de Chile (diciembre, 2019).

Otro ejemplo importante de un formato de captura de información, esta vez para una escala global y con la participación de diversos países, es el propuesto para el estudio de línea base global, (Demetriades et al., 2022; Wang, 2015), el cual es un ejemplo de integración de información geoquímica bajo un mismo medio de muestreo, con una información de campo uniforme entre todos los países participantes (Figura 7.2.7). Haciendo funcional ó siendo funcional el manejo de información geoquímica.



Global Geochemical Reference Network field observations sheet

Field Observations Sheet **RESIDUAL SOIL**

TOP Sample ID : _____ Date: _____
 BOTTOM Sample ID: _____ Country: _____
 Organisation: _____ Sampler: _____
 GTN Coordinator if different from above: _____

SAMPLE SITE LOCATION Region: _____ Map sheet: _____

COORDINATES (Use Geographical coordinates WGS84 ONLY in decimal degrees):
 East West: _____ ° North South: _____ °
 Altitude: _____ metres above mean sea level

SAMPLE SITE DESCRIPTION
 Approximate size of catchment basin _____ km²
 Landscape / topography: _____
 Land use: Agriculture Pasture, grassland, fallow field
 Forest Wetland
 Non-cultivated, moorland, etc.; Other, specify _____
 Bedrock lithology: _____ Outcrops: Yes, specify _____

SITE DESCRIPTION
 Depth of observed ground water table (cm): _____
 Grain size range of TOP sample: sand-silt; silt-clay; clay
 Abundance of organic matter in % (Top sample): _____ %
 Abundance of clasts >2 mm in % (Top sample): _____ %
 Soil moisture on day of sampling: Dry; Medium; Wet
 Grain size range of BOTTOM sample: sand-silt; silt-clay; clay
 Abundance of organic matter in % (Top sample): _____ %
 Abundance of clasts >2 mm in % (Bottom sample): _____ %
 Soil moisture on day of sampling: Dry; Medium; Wet

Sampling interval (Note: Sample SINGLE horizons only)
 TOP sample: 0-20 cm; Other, specify: from _____ to _____ cm
 BOTTOM sample: from _____ to _____ cm

Possible sources of contamination, specify: _____
 Distance to minor road: _____ m; Distance to major road: _____ m

GAMMA RADIATION (cps) Total: _____ Th: _____ U: _____ K: _____
 Instrument type: _____

REMARKS (any unusual observations)

Photographs: _____

Figura 7.2.7. Ejemplo de ficha del campo de suelos a tomar en proyectos internacionales (Demetriades et al., 2022)

7.2.1.2 Información de análisis químicos.

En relación con la información relacionada a los análisis químicos, esta es suministrada por laboratorios internos (propios de las instituciones) o por laboratorios comerciales, y su utilización corresponde a la infraestructura de la empresa o institución, y a las necesidades de presentación de los datos, ya que para proyectos de exploración que coticen en bolsa de valores se exigen la realización de los análisis químicos en laboratorios comerciales y no de instituciones científicas o educativas, sin embargo todos los análisis deben ser realizados por laboratorios acreditados y con controles de calidad establecidos en sus procedimientos.

En términos generales tanto para laboratorios de instituciones académicas como comerciales, la información de los resultados analíticos incluye:

- Nombre del laboratorio
- Un número de orden de servicio que en la mayoría de los casos corresponde a la solicitud realizada al laboratorio.
- Las técnicas analíticas utilizadas, los cuales incluyen métodos de preparación de las muestras y el procedimiento analítico, es importante resaltar que estos procedimientos se encuentran codificados y para un correcto almacenamiento de la información es importante unificar la nomenclatura, en especial cuando se cuenta con información de diversos laboratorios.
- Certificados de control de calidad donde se incluyen estándares, duplicados y blancos, este certificado de control de calidad corresponde a los procedimientos propios de cada laboratorio y son independientes a los protocolos de control de calidad y aseguramiento que se implementan en los proyectos de geoquímica aplicada.
- Por último se presenta la información de los resultados analíticos; estos se encuentran organizados por código de muestra y se expresa el valor analítico por elemento, especificando el método analítico utilizado y la unidad de medición ya sean partes por millón, partes por billón, porcentaje, entre otros. En caso de que un valor sea inferior al límite de detección de un método analítico, el valor mínimo aparecerá expresado con un símbolo < o -. Un punto importante reviste las unidades ya que se pueden utilizar diversas nomenclaturas, por ejemplo, para valores expresado en unidades de partes por millón, se puede utilizar utiliza tanto **ppm** o como **mg/kg**, siendo necesario unificar la nomenclatura para un correcto almacenamiento de información.

7.2.2 Carga de información.

El cargue de información geoquímica se encuentra dividida en dos etapas, una primera etapa es la información adquirida en campo, la cual corresponde a los formatos de captura de información y las observaciones hechas en campo; para el cargue de información de esa etapa se recomienda que sea realizada por el profesional que desarrollo el trabajo de campo. Los formatos de captura de información pueden ser cargados mediante hojas de cálculo formularios desplegables y con opciones predefinidas; que alimenten una base de datos.

La segunda etapa corresponde a la carga de información de los resultados analíticos, y se recomienda que sea realizada por un administrador de base de datos o por una persona que administra dicha información, esto debido a que es necesario llevar un seguimiento constante de los resultados de laboratorio, y adicionalmente realizar la consolidación de la información de campo y de los resultados de laboratorio.

Una vez consolidada la información y carga final a la base de datos se puede proceder a hacer la depuración de información, transformación de unidades, reemplazo de datos para límites de detección y demás adecuaciones propias para el inicio de la interpretación de los datos geoquímicos.

7.2.2.1 Validación de información.

Una parte importante realizada por el administrador de la base de datos o quien realice dichas funciones, es el proceso de validación de información, etapa donde es posible identificar errores en el cargue de información, y de los procedimientos de campo o en los procedimientos analíticos, esta revisión y validación de información busca la administración y consulta de la información geoquímica de la mejor forma en su organización y consistencia.

Dentro de los pasos que se adelantan en la validación de información para el cargue de información de campo se tiene:

- Verificación de coordenadas. Revisión de la distribución geográfica de las muestras del proyecto.
- Fecha de toma de muestra. Confirmación de la fecha de toma de muestra en campo de acuerdo con el proyecto.
- Tipo de muestra / Subtipo de muestra. Confirmación de los campos de acuerdo con el tipo de muestra e identificación de la muestra, consignados en el formato de captura de información de campo.
- Proyecto. Verificación de la asignación de nombre de proyecto a las muestras y asociación de las muestras pertenecientes a un mismo proyecto.
- Entidad. Verificación de la entidad o institución responsable de la recolección de la muestra.

Para la información analítica se pueden utilizar entre otros:

- Revisión de la técnica analítica. Revisión del método de preparación de la muestra asociada a la técnica y al elemento químico cuantificado.
- Revisión de la coherencia entre los resultados geoquímicos versus técnica analítica. La verificación incluye la revisión de las unidades de concentración analítica registrada en cada reporte (cuando se presentó un dato sospechoso), límites de detección y/o cuantificación, asociaciones geoquímicas básicas, entre otros.
- Validación de los datos de control de calidad del reporte asociado a cada grupo de muestras. Revisión de duplicados de análisis, blancos y Materiales de Referencia Certificados (MRC).

Ejemplo de Colombia

En términos generales como resumen del proceso de almacenamiento y manejo de información se presenta el flujo grama de trabajo (Figura 7.2.8), donde se ilustra el procedimiento para la recepción de información, cargue, control de datos analíticos y visualización.

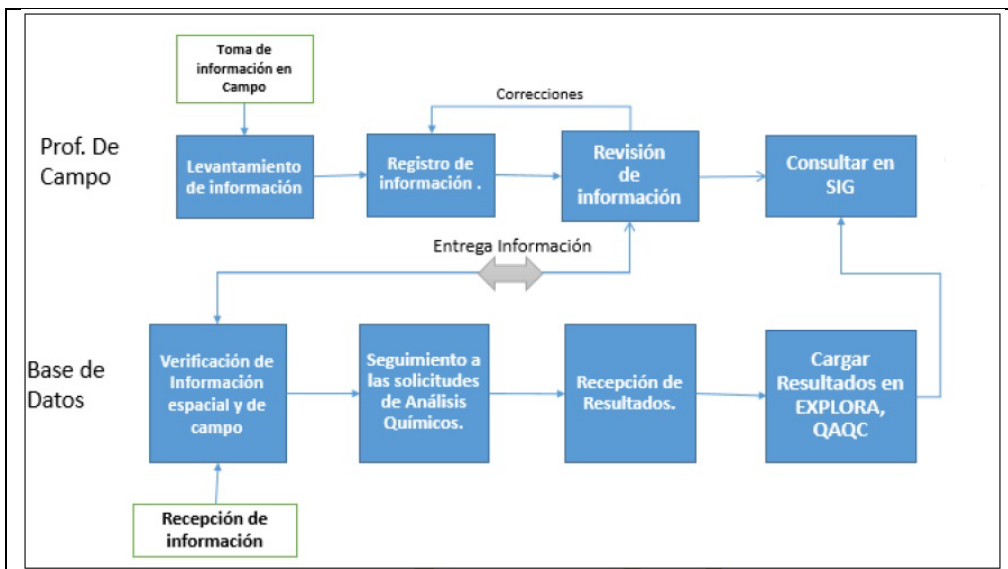


Figura 7.2.8. Diagrama de recepción de información, cargue y control de calidad de los resultados analíticos de los SGC

Ejemplo de Chile

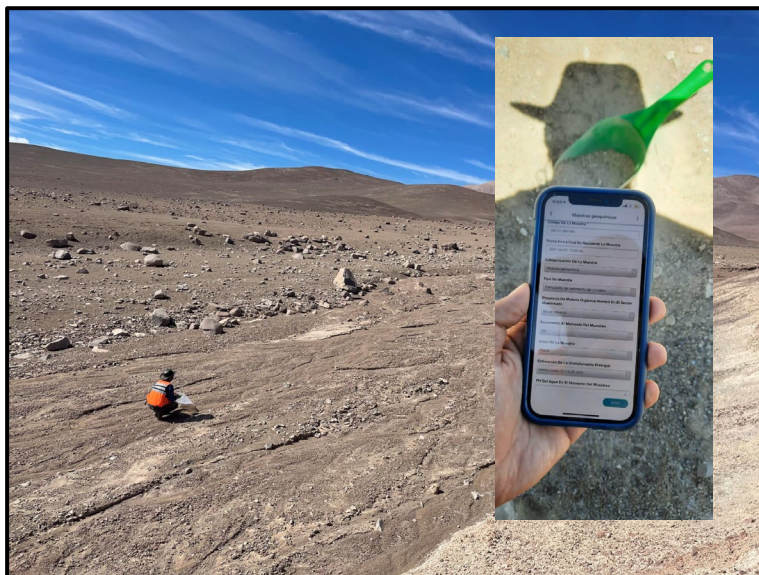


Figura 7.2.9. - Primera prueba de campo del levantamiento de datos de terreno mediante smartphones, durante el muestreo geoquímico de la Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta, norte de Chile (Abril, 2021). Se observa el detalle de las listas desplegadas en smartphones, para el levantamiento de información de terreno en forma estandarizada. Fotografías tomadas por los Sres. Braulio Águila y Eduardo Martínez.

7.2.3 Manejo y repositorio de información geoquímica.

Una vez cargada y validada la información, es necesario mantener un repositorio de la información recolectada en campo y de los resultados analíticos, también tener un correcto repositorio y manejo de las contra muestras y rechazos de la muestra física, la cual permitirá la realización de análisis posteriores en caso de ser requeridos.

7.2.3.1 Repositorio de la información recolectada en campo y de los resultados analíticos

Para su organización y consulta se utilizan base de datos, las cuales dependerán de la complejidad del proyecto, también de los recursos con los que cuenta la institución o empresa y de la experticia en el manejo de datos que tengan el administrador. Para algunos proyectos es común la utilización de hojas de cálculo, las cuales permiten almacenar la información de manera organizada, realizar consultas rápidas, realizar procesamientos estadísticos básicos y permiten utilizar la información en diversos programas geostatísticos.

Sin embargo es importante resaltar que el uso de hojas de cálculo presenta problemas de manejo de información para grandes volúmenes de datos y para el uso de gran cantidad de variables, de igual manera en la consulta por parte de varios de usuarios y no permite una correcta consulta vía online, también dificulta la aplicación para consultas mas elaboradas o aplicaciones de ciencia de datos, razón por la cual es aconsejable la implementación de bases de datos en lenguajes mas robustos como SQL. También se aconseja tener un repositorio de información alternativo representado en **backup** o copias de seguridad de la base de datos, en caso de presentarse problemas en las plataformas tecnológicas. Otra información importante de mantener en los repositorios de información son los formatos de captura de información de campo, fotografías, tracks de GPS y los resultados de los analisis entregados por el laboratorio, esto en caso de ser necesario la verificación primaria de la información almacenada.

Ejemplo de Chile



Figura 7.2.10. - Vista de la pantalla del PC del jefe de proyecto. El uso de smartphones permite una actualización en tiempo real (automática; en línea) del muestreo geoquímico en una zona de trabajo. Esto permite coordinar desde el gabinete, el avance de un proyecto determinado, verificando las muestras y subcuencas muestreadas (puntos y polígonos verdes) versus la planificación original (puntos y polígonos rojos).

La vinculación de la toma de datos, con un software adecuado permite lo siguiente:

1. Coordinar desde el gabinete, el avance en tiempo real, del muestreo geoquímico planificado (Fig. 7.2.10.).
2. Generar insumos y gráficos para controlar y planificar el avance del proyecto (7.2.10).

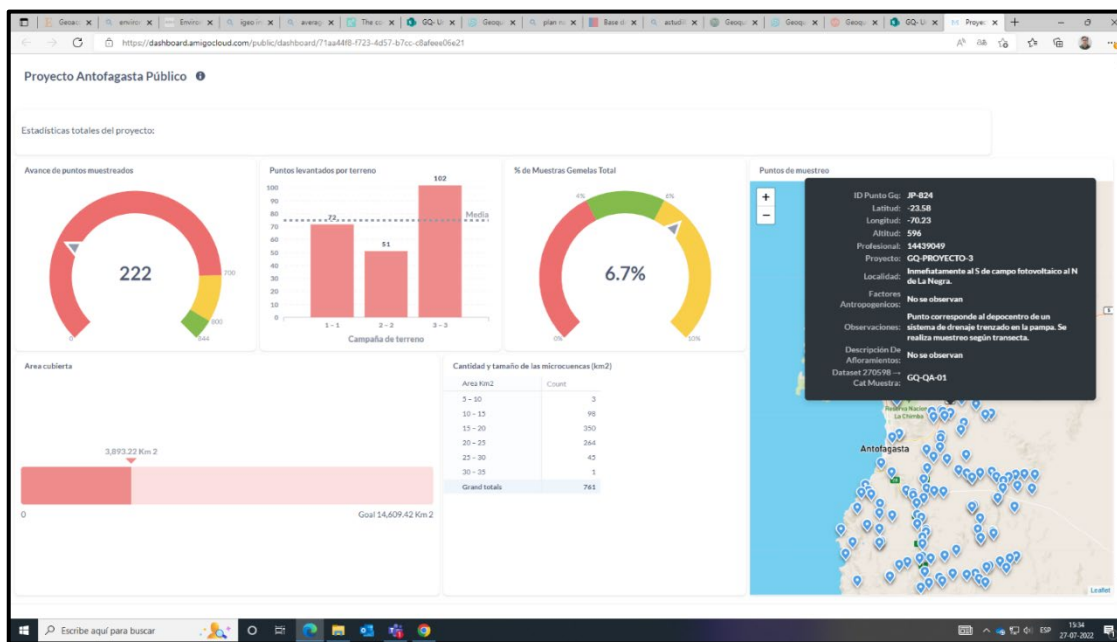


Figura 7.2.11. - Vista de la pantalla resumen del avance del proyecto (*Dashboard*). Se observan algunos de los gráficos de control estadístico del proyecto incluyendo: 1) porcentaje de avance; 2) número de muestras gemelas (para fines de control de calidad); 3) número de puntos de muestreo muestreados por cada terreno.

7.2.3.2 Repositorio de contra muestras y rechazos de laboratorio.

En relación con el repositorio del material muestreado en campo, este puede estar representado como rechazos de laboratorios (muestras entregadas por el laboratorio posterior a los procesos de preparación y análisis) o muestras de respaldo (muestras tomadas en campo, las que son almacenadas para futuros análisis), y deben estar debidamente almacenadas y claramente identificadas. En caso de existir estos materiales almacenados se hace necesario cargar la información de este material a la base de datos, esta información puede incluir aspectos básicos como ubicación de la muestra (lugar de almacenamiento), cantidad y tipo de material.

Un aspecto importante del repositorio de estos materiales y en especial para las muestras de rechazos del laboratorio, tiene que ver con su empaque, el que debe ser hermético para evitar lo que se denomina contaminación cruzada (intercambio de partículas entre muestras) ya que se perdería la calidad de la muestra y se incurriría en posibles errores para reanálisis posteriores. Para campañas de muestreo de sedimentos y suelos, se recomienda la toma de una buena cantidad de muestra con el objetivo de poder

almacenar la mitad de estas (contra muestra) y ser utiliza en posteriores análisis evitando de esta manera las posibles contaminaciones de los procesos de preparación y análisis.

Ejemplo de Colombia

Ejemplo de la litoteca nacional Tierra de Paz, perteneciente al Servicio Geológico Colombiano.



Figura 7.2.12. Fotografías de núcleos de perforación debidamente almacenados, marcados y empacados, fotografía tomada en la litoteca nacional Tierra de Paz, perteneciente al Servicio Geológico Colombiano.

Ejemplo de Portugal

Litoteca de Aljustrel a partir de un conjunto de litotecas de LNEG. En esta litoteca se almacenan los sondeos de las empresas que operan en el sur de Portugal, especialmente en la Faja Pirítica y muestras de suelos, sedimentos y rocas de proyectos LNEG y entidades que le antecedieron (Fig. 7.2.13).



Figura 7.2.13. Fotografías tomadas en la litoteca de Aljustrel, perteneciente al Laboratorio Nacional de Energía e Geología de Portugal

Ejemplo de España



Figura 7.2.14. Fotografías tomadas en la litoteca de Peñarroya, perteneciente al Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Ejemplo de Chile

Desde su inicio en el año 2010, el Programa de Cartografía Geoquímica de Chile, a cargo de SERNAGEOMIN, consideró establecer un repositorio de las muestras recolectadas. En este repositorio, localizado en el Laboratorio de SERNAGEOMIN, se almacenan las muestras originales y las fracciones resultantes de su preparación (Figs. 7.2.15. e 7.2.16.).



Figura 7.2.15. - Vista general del repositorio de muestras geoquímica, del Laboratorio de SERNAGEOMIN. Detalle del repositorio de muestras geoquímica, del Laboratorio de SERNAGEOMIN. Se observa un cajón conteniendo la muestra original (1/2 del volumen inicial) y los remanentes de la preparación de las muestras indicadas en el rótulo. Fotografías de Rafael Mardones.



Figura 7.2.16. - Detalle del repositorio de muestras geoquímica, del Laboratorio de SERNAGEOMIN. Se observan las distintas fracciones guardadas de una muestra determinada. De izquierda a derecha: 1) muestra original (1/2 del volumen inicial); 2) fracción sobre malla #10; 3) Fracción sobre malla #80; 4) Pulpa resultante de la molienda de la fracción bajo la malla #80. Fotografías de Rafael Mardones.

Ejemplo de Uruguay



Figura 7.2.17. - Litoteca del área Geología de la DIRECCIÓN NACIONAL DE MINERÍA Y GEOLOGÍA de Uruguay.

Bibliografía

- Alfaro, M. 2000. Estadística. Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de Chile. 114 p.
- Agnew, P. D., Muhling, J., & Goldfarb, R. J., 2004. Applications of geochemistry in targeting with emphasis on large stream and lake sediment data compilations. *Predictive Mineral Discovery Under Cover*, 232.
- Armour-Brown A and Nichol I., 1970. Regional geochemical reconnaissance and the location of metallogenic provinces. *Economic Geology* 65(3): 312–330.
- ASTM International, 2004. Standard Test Method for Aluminum in Water1 (ASTM: D 857-02). <https://www.astm.org>
- Aucott, J.W., (1987)- Workshop 5. Geochemical Anomaly Recognition, *Journal of Geochemical Exploration*, 29, 375-376.
- Baldé, A. & Lastra, J., 2018. Aplicación integrada de la estadística multivariada y análisis fractal a datos litogeoquímicos en el distrito metalogenético Dora-Francisco, Pinar del Rio. Universidad del Pinar del Rio, Cuba. 140-154 p.
- Batista, M. J. 2003. Comportamento de elementos químicos no sistema rocha-solo-sedimento-planta na área mineira de Neves Corvo: Implicações ambientais. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Geociências, 393p.
- Batista, M.J., Sousa, A.J., Abreu, M.M., Serrano Pinto, M., 2007. Biogeochemistry in Neves Corvo mining region, Iberian Pyrite Belt, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, 92: 159-176.
- Batista M. J., Mateus A., Matos J. X., Gonçalves M. A., Figueiras J., Abreu M. M., Luz F., 2020. Geochemical exploration and assessment of environmental impacts in the Portuguese sector of the Iberian Pyrite Belt. *Comunicações Geológicas* 107, III, 79-90.
- Bjorklund, A., 1992, Proposals for future Global Geochemical Sampling for presentation at IGCP 259, Keyworth.
- Boqué, R., 2014. El límite de detección de un método analítico. *Universitat Rovira i Virgili. Grupo de Quimiometría y Cualimetría*. 9p.
- British Geological Survey. Panned-concentrate drainage sampling. <https://www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1320>
- 3ª Brigada de Prospecção de Urânio, 1980. Carta Hidrogeoquímica Com Os Teores Em U (Ppb) Nas Águas Superficiais (1:50 000) (Área Norte). Relatório geológico-mineiro do Serviço de Fomento Mineiro. Direcção Geral de Geologia e Minas de Portugal.
- BGS, 1992. Regional Geochemistry of the Lake District and Adjacent Areas, p. 98. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- BGS, 2000. Regional Geochemistry of Wales and West-central England: Stream Sediment and Soil. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- Carranza, E. J. M. 2004. Usefulness of stream order to detect stream sediment geochemical anomalies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* (2004) 4 (4): 341–352.
- Cavalcante, R.; Cunha, A.L.C.; Oliveira, R.G.; Medeiros, V.C.; Dantas, A.R.; Costa, A.P.; Lins, C.A.C.; Larizzatti, J.H., 2016. Metalogenia das Províncias Mineraias do Brasil: Área Seridó-Leste, extremo nordeste da Província

Borborema (RN-PB): escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 103 p. il. Color., 1 CD-ROM. ISBN 978-85-7499-271-6

- Clarke, F. W., 1924. *The Data of Geochemistry*. Fifth Edition, Washington Government Printing Office, 841p.
- Córdova, M., 2003. *Estadística descriptiva e inferencial*. 5ª Edición, reimpresso en 2014, Lima, Editorial: MOSHERA S.R.L., 487 p. Darnley, A., Björklund, A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P., Plant, J., Steenfelt, A., Tauchid, M., y Xie, X. (1995). A global geochemical database for environmental and resource managements. Final report of IGCP project 259.
- Daneshfar, B. & Cameron, E., 1998. Leveling geochemical data between map sheets. *Journal of Geochemical Exploration* 63, pp.189–201.
- Darnley, Arthur G., 1990. International geochemical mapping: a new global project. *Journal of Geochemical Exploration*, 39(1–2), 1–13. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(90\)90066-J](https://doi.org/10.1016/0375-6742(90)90066-J)
- Darnley, A.G., Björklund, A., Bølviken, B., Gustavsson, N., Koval, P.V., Plant, J.A., Steenfelt, A., Tauchid, M., Xie Xuejing, Garrett, R.G., & Hall, G.E.M. 1995. A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management: Recommendations for International Geochemical Mapping. Final report of IGCP Project 259. 2nd revised edition. Paris: UNESCO, 122p.
- Darnley, A.G., 1995. International geochemical mapping - a review. *Journal of Geochemical Exploration*, 55, 5–10.
- De La Cruz, C., 2018. Análisis y caracterización geoquímica por dispersion secundaria en el sureste de la intercuenca Alto Marañón IV entre Bambamarca y Pisúquia, norte del Perú. UNDAC. Tesis de grado, 260 p. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/486>
- Desharnais, G., Paiement, J.P., Hatfield, D. & Poupart, N., 2017. Mining big data: the future of exploration targeting using machine learning. 5 p.
- De Vos, W., Demetriades, A., Marsina, K., Ottesen, R.T., Reeder, S., Pirc, S., Salminen, R. & Tarvainen, T., 2006b. Lead. In: W. De Vos, T. Tarvainen (Chief Editors), R. Salminen, S. Reeder, B. De Vivo, A. Demetriades, S. Pirc, M.J. Batista, K. Marsina, R.T. Ottesen, P.J. O'Connor, M. Bidovec, A. Lima, U. Siewers, B. Smith, H. Taylor, R. Shaw, I. Salpeteur, V. Gregorauskiene, J. Halamic, I. Slaninka, K. Lax, P. Gravesen, M. Birke, N. Breward, E.L. Ander, G. Jordan, M. Duris, P. Klein, J. Locutura, A. Bel-lan, A. Pasieczna, J. Lis, A. Mazreku, A. Gilucis, P. Heitzmann, G. Klaver & V. Petersell, *Geochemical Atlas of Europe. Part 2 - Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Figures, Maps, and Related Publications*. Geological Survey of Finland, Espoo, 283–290; <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/Pb.pdf>.
- Demetriades, A., 2014. Basic Considerations: Sampling, the Key for a Successful Applied Geochemical Survey for Mineral Exploration and Environmental Purposes. In *Analytical Geochemistry/Inorganic Instrument Analysis* (2nd ed., Vol. 15). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01401-7>
- Demetriades, A., Birke, M., Albanese, S., Schoeters, I., De Vivo, B. 2015. Continental, regional and local scale geochemical mapping. *Editorial Journal of Geochemical Exploration*, 154, 1-5.
- Demetriades, A., Johnson, C.C., Smith, D.B., Ladenberger, A., Sanjuan, P.A., Argyraki, A., Stouraiti, C., Caritat, P. de, Knights, K.V., Prieto Rincón, G. & Simubali, G.N. (Editors), 2022. *International Union of Geological Sciences Manual of Standard Methods for Establishing the Global Geochemical Reference Network*. IUGS Commission on Global Geochemical Baselines, Athens, Hellenic Republic, Special Publication, 2, 515 pp., 375 figures, 35 Tables, 5 Annexes, and 1 Appendix
- Dowling Carolyn, Susan A. Welch, W. Berry Lyons., 2019. The geochemistry of glacial deposits in Taylor Valley, Antarctica: Comparison to upper continental crustal abundances. *Applied Geochemistry* 10791 – 104.

- Environmental Protection Agency (EPA), 2006. Data quality assessment: statistical methods for practitioners, EPA QA/ G-9S. Washington, DC: 20460. 198 p.
- Espino, C., 2017. Análisis predictivo: técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo - herramientas Open Source que permiten su uso. Trabajo de fin de grado, Universitat Oberta de Catalunya, España, 65 p.
- Fernández, R. R. (2017)- Análisis geoestadístico y numérico de datos geoquímicos de sondeos de exploración minera, casos de depósitos epitermales. Revista De La Asociación Geológica Argentina, 74(4), 537-552 p.
- Ferrer, R., Freixa, M., Guàrdia, J. & Horber, E., 1992. Aportaciones del análisis exploratorio de datos en el estudio de la resistencia. Anuario de Psicología. (55). 23-36 p.
- Ferreira, A.M.P.J., 2000. Dados geoquímicos de base de sedimentos fluviais de amostragem de baixa densidade de Portugal Continental: Estudo de factores de variação regional. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Doutor em Geociências, 226 p. <https://repositorio.ineg.pt/handle/10400.9/542>.
- Fauth H, Hindel R, Siewers U, and Zinner J (1985) Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland, p. 79. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Filzmoser P, Garrett R, Reimann C. 2005. Multivariate Outlier Detection in Exploration Geochemistry. Comput. Geosci. 31(5):579-587.
- Fisher, P. 1968. Interpreting Pan-concentrate analysis of stream sediments in geochemical exploration for gold. Geological survey circular 592. Washington.
- Fletcher, W., 1997. Stream Sediment Geochemistry in Today's Exploration World. Exploration 97 Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 249-260. http://exploration07.com/pdfs/Expl97/03_05_.pdf
- García, O. & Moreno, G., 2006. Herramientas de Análisis Estadístico y Espacial aplicadas en la separación Línea Base – Anomalía Geoquímica. Implicaciones en Exploración de Recursos Naturales. Parte 1: Revisión metodológica. GEOLOGÍA COLOMBIANA, 31, 27-38 p.
- Garrett RG and Nichol I (1967) Regional geochemical reconnaissance in eastern Sierra Leone. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy 76: B97-B112.
- Garrett, R.G., 1984. Workshop 5. Thresholds and Anomaly Interpretation, Journal of Geochemical Exploration, 21, 137-142.
- Garrett, R.G., 1989. The Role of Computers in Exploration Geochemistry, in G.D. Garland, ed., Proceedings of Exploration '87: Third Decennial International Conference on Geophysical and Geochemical Exploration for Minerals and Groundwater, Ontario Geological Survey, Special Volume 3, 586-608 p.
- Garrett, R.G., 1991. The management, analysis and display of exploration geochemical data. in Exploration Geochemistry Workshop, Geological Survey of Canada, Open File 2390, 9.1- 9.41. Gasparon M. & Jörg Matschullat. Geogenic sources and sinks of trace metals in the Larsemann Hills, East Antarctica: Natural processes and human impact. Applied Geochemistry Volume 21, Issue 2, February 2006, Pages 318-334
- Golterman, H.L., Sly, P.G. & Thoma, R.L. 1983. Relationship between Water Quality and Sediment Transport. Unesco.
- Gorgas, J., Cardiel, N. & Zamorano, J., 2011. Estadística Básica para estudiantes de ciencias. Universidad Complutense de Madrid. 258 p.

- Grunsky, E., 2010. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 10; p. 27-74
- Grunsky, E. & Caritat, P. 2019. State of the art analysis of geochemical data for mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 20. 217-232 p.
- Habibnia, A., Rahimpour, G. R., & Ranjbar, H., 2020. Equivalence Assessment of Multiple Datasets by Quantile–Value Diagram (QVD) for Detection of Significant Shifts (Case Study: Geochemical Datasets from Hanza Region, Kerman, Iran). *Geochemistry International*, 58(2), 212-228.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., Black, W., 1999. *Análisis multivariante 5ª*. Ed. Prentice Hall International. Inc.
- Hawkes, H. E., 1949. Principles of Geochemical Prospecting. *Geological Survey Bulletin*, 1000-F, 225-355.
- Hawkes, H. E. J. S. Webb, 1962. *Geochemistry in Mineral Exploration*. Harper & Row, Publishers, New York, 415p.
- Helsel, D., 2010. Much ado about next to nothing: Incorporating nondetects in Science. *Oxford University Press*. 54(3). 257-262 p.
- Hewett, P. & Ganser, G., 2007. A comparison of several methods for analyzing censored data. *Oxford University Press*. 51(7). 611-632 p.
- Hoffman, E. L., Clark, J. R., & Yeager, J. R., 1998. *Gold_Analysis-Fire_Assaying_and_Alt_Methods.pdf*. *Explor.Mining.Geol*, 7(1 and 2), 155–160.
- Hottelling, H., 1933. Analysis of a Complex of Statistical Variables Into: Principal Components, *Journal of Educational Psychology* (24). 417-441 p. and 498-520 p.
- Howarth, R.J. and Sinding-Larsen, R., 1983. Multivariate Analysis, Chapter 6, *Statistics and Data Analysis in R.J. Howarth, ed., Geochemical Prospecting, 2*, in G.J.S. Govett, ed., *Handbook of Exploration Geochemistry*, Elsevier. 207-289.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 2017. *Atlas Geoquímico del Perú*. Lima: INGEMMET, 194 p. IGME, España.
- Atlas Geoquímico de España, 2012. Visor Web. http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx#IGME_Mapalsovalores2012_Sb
- IGS, 1978. *Regional Geochemical Atlas: Shetland*. London: Institute of Geological Sciences. Jacobs DE, Clickner RP, Zhou JY, et al. (2002) The prevalence of lead-based paint hazards in U.S. housing. *Environmental Health Perspectives* 110: A599–A606.
- INGEMMET, 2005. *Geocatmin, Perú*. <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- International Organization for Standardization. *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. (ISO/IEC 17025)*. <https://www.iso.org/>
- Iwamori, H., Yoshida, K., Nakamura, H., Kuwatani, T., Hamada, M., Haraguchi, S. & Ueki, K., 2017. Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses. *Geoquímica, Geofísica, Geosistemas*: 18(3). 994-1012 p.
- Jackson, S. E., Fryer, B. J., Gosse, W., Healey, D. C., Longerich, H. P., & Strong, D. F., 1990. Determination of the precious metals in geological materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) with nickel sulphide fire-assay collection and tellurium coprecipitation. *Chemical Geology*, 83, 119–132.
- Johnson, C. C., Ander, E. L., Lister, T. R., & Flight, D. M. A., 2018. *Data Conditioning of Environmental Geochemical Data: Quality Control Procedures Used in the British Geological Survey's Regional Geochemical Mapping*

- Project. In *Environmental Geochemistry: Site Characterization, Data Analysis and Case Histories: Second Edition* (2nd ed.). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63763-5.00006-9>
- Keith, L., Crummett, L., Deegan, J. Libby, R., Taylor, J. & Wentler, G., 1983. Principles of environmental analysis. American Chemical Society.55(14): 2210-2218.
- Kurzl, H., 1988. Exploratory data analysis: recent advances for the interpretation of geochemical data. *Journal of Geochemistry Exploration*: 30. 309- 322 p.
- Krauskopf, K.B., 1979. *Introduction to Geochemistry*. Mc Graw-Hill International.
- Lacassie, Juan Pablo, Felipe Astudillo, Carlos Johnson & Pablo Sebastian Oliva Vicentelo. Reconnaissance survey of the Chilean part of Tierra del Fuego, a sub-antarctic terrain as a contribution to the IUGS Manual of Standard Methods for Global Geochemical Baselines and Regional Geochemical Surveys, Technical Report. 2020 ANNUAL REPORT of the INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES COMMISSION ON GLOBAL GEOCHEMICAL BASELINES. <https://www.globalgeochemicalbaselines.eu/content/90/annual-reports/>
- Lacassie, J.; Astudillo, F.; Baeza, L.; Castillo, P.; Figueroa, M.; Muñoz, N.; Ramírez, C. 2012. Geoquímica de sedimentos de la Hoja Iquique, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geoquímica 1: 41 p., 1 mapa interactivo escala 1:250.000, 2 anexos (1 DVD versión 1.0). Santiago.
- Larizzatti, J.H.; Marques, E.D.; Silveira, F.V., 2014. Mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno. Rio de Janeiro: CPRM. 208p. Informe de recursos minerais. Série metais - Informes gerais; 2). Programa Geologia do Brasil. ISBN 978-85-7499-153-5
- Lepeltier, C., 1969. A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Econ. Geol.* V. 64: 538-550 p.
- Locutura, J., Bel-lan, A., García Cortés, A., Martínez, S. 2012. Atlas Geoquímico de España. Publicación del IGME. Madrid. 608 pp., 998 mapas, 154 gráficos Maluenda, R., 2014. Fundamentos de estadística. Diplomado internacional en geoestadística aplicada a la evaluación de recursos mineros. BSgrupo, 224p.
- Mann, A.W., Gay, L.M., Birrell, R.D., Webster, J.G., Brown, K.L. Mann, A.T. Humphreys, D.B., Perdrix, J.L., 1995. Mechanism of formation of mobile metal ion anomalies. Minerals and Energy Research Institute of Western Australia, Report No. 153, 407 pp.
- Mena, M., 2016. La estadística como herramienta en ciencias de la tierra 1ª ed. Buenos aires: Librería Akadia Editorial, 625 p.
- Meyer, W.T., Theobald, P.K., Jr., Bloom, H., 1979. Stream Sediment Geochemistry; In: *Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores*; Peter J. Hood, editor; Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, 411-434.
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K. & Chiu, S.N., 2000. *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*. Wiley, 696 pp.
- Oliveira, D. 1999. Nota Sobre A Amostragem Litogeoquímica em Rochas da Zona de Ossa Morena a Sul do Contacto com a Zona Centro Ibérica no Âmbito do Projecto 2.1.4 (Estudos De Inventariação Do Potencial De Recursos Em Terras Raras E Caracterização Dos Seus Metalotectos). Relatório geológico-mineiro do Serviço de Fomento Mineiro. Direcção Geral de Geologia e Minas de Portugal.
- Oliveira, J. Farinha, J. 1986. Estudos de Geoquímica Aplicada na Região Aurífera Vizinha de Três Minas. Relatório geológico-mineiro do Serviço de Fomento Mineiro. Direcção Geral de Geologia e Minas de Portugal, 79p.

- Oliveira J., Farinha Ramos J., Simões M., 1980. A Litogeoquímica Na Definição Das Relações Entre Granitóides E Mineralizações De Sn-W. Relatório geológico-mineiro do Serviço de Fomento Mineiro. Direcção Geral de Geologia e Minas de Portugal, 25p.
- Otavio A. B. L., Carlos S. B. M. & Cassio R. S. 2007. Prospecção Geoquímica. Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 788p.
- Ottesen, R., Bogen, J., y Finne, T. (2010). Geochemical atlas of Norway Part 2: Geochemical atlas of Spitsbergen.
- Peacock, B. T. R. 2002. Chapter A3 Soil sample preparation. Analytical Methods for Chemical Analysis of Geological Materials. <https://www.gov.nl.ca/nr/mines/geoscience/reports-maps/docs/of-nfld-3316/>
- Peacock, B. T. R., Taylor, C. D., & Theodorakos, P. M., 2002. Chapter A2 Stream-sediment sample preparation. Analytical Methods for Chemical Analysis of Geological Materials. <https://www.gov.nl.ca/nr/mines/geoscience/reports-maps/docs/of-nfld-3316/>
- Pearson, K., 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine* 2:559-572 p.
- Pereira, B., Vandeuren, A., & Sonnet, P., 2015. Geochemical mapping based on multiple geochemical datasets: A general method, and its application to Wallonia (Southern Belgium). *Journal of Geochemical Exploration*, 158, 34-43.
- Pereira, B., Vandeuren, A., Govaerts, B. B., & Sonnet, P., 2016. Assessing dataset equivalence and leveling data in geochemical mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 168, 36-48.
- Piercey, S. J., 2014. Modern Analytical Facilities 2. A Review of Quality Assurance and Quality Control (QA/QC) Procedures for Lithogeochemical Data. *Geoscience Canada*, 41(1), 75–88.
- Plant, J. A., Hale, M., Ridgway, J., 1988. Developments in regional geochemistry form mineral exploration. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, 97, B116–B140.
- Prieto-Rincón, C., & Espinosa-Gonzalez, A. 2011. Manual de geoquímica. Muestreo de ultra baja densidad y de baja, media y alta densidad. Servicio Geológico Colombiano. Colección Guías y Manuales.
- Rankama, K. and Sahama, T.G., 1950. *Geochemistry*. University of Chicago Press, Chicago, 912 p.
- Reimann, C., Ayras, M., Chekushin, V., Bogatyrev, I., Boyd, R., Caritat, P. de, Dutter, R., Finne, T.E., Halleraker, J.H., Jaeger, O., Kashulina, G., Lehto, O., Niskavaara, H., Pavlov, V., Raisanen, M.L., Strand, T y Volden, T., 1997. *Atlas Geoquímico Ambiental de la región de Barents Central*.
- Reimann, C. & Garret, R., 2005. Geochemical background - Concept and reality. *Geochemical background - Concept and reality* (350). 12 – 27 p.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R.G., (2005)- Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Sci. Total Environ.* 346, 1–16 p.
- Reimann, C., 2008. EuroGeoSurveys Geochemical mapping of agricultural and grazing land soil of Europe (GEMAS). Field manual. NGU Report 2008.038.
- Reimann, C., Birke, M., Demetriades, A., Filzmoser, P. & O'Connor, P. (Editors), 2014a. Chemistry of Europe's agricultural soils – Part A: Methodology and interpretation of the GEMAS data set. *Geologisches Jahrbuch (Reihe B 102)*, Schweizerbarth, Hannover, 528 pp. + DVD

- Reimann, C., Birke, M., Demetriades, A., Filzmoser, P. & O'Connor, P. (Editors), 2014b. Chemistry of Europe's agricultural soils – Part B: General background information and further analysis of the GEMAS data set. *Geologisches Jahrbuch (Reihe B 103)*, Schweizerbarth, Hannover, 352 pp.
- Rendón-Macías, M., Villasís-Keever, M. & Miranda-Navales, M., 2016. Estadística descriptiva. *Rev Alerg Mex*: 63(4):397-407 p.
- Rivera, H., 2007. *Introducción a la geoquímica general y aplicada*. Segunda Edición. Lima. 476p.
- Rollinson, H. R., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, England.
- Rollinson, H., & Pease, V., 2021. Using Geochemical Data. In *Using Geochemical Data*. <https://doi.org/10.1017/9781108777834>
- Sandström, H., Reeder, S., & Bartha, A., Birke, M., Berge, F., Davidsen, B., Grimstvedt, A., Hagel-Brunnström, M-L., Kantor, W., Kallio, E., Klaver, G., Lucivjansky, P., Mackovych, D., Mjartanova, H., van Os, B., Paslawski, P., Popiolek, E., Siewers, U., Varga-Barna Z., van Vilsteren, E., Ødegård M., 1998. Sample preparation and analysis. *Geochemical Atlas of Europe*, 1–14. <http://193.167.179.3/publ/foregsatlas/articles/Analysis.pdf>
- Salahoris, M., 2022. Geodetic Levelling of Existing Geochemical Data Sets. Annexe A2.1 in Chapter 2 In: Demetriades, A., Johnson, C.C., Smith, D.B., Ladenberger, A., Sanjuan, P.A., Argyraki, A., Stouraiti, C., Caritat, P. de, Knights, K.V., Prieto Rincón, G. & Simubali, G.N. (Editors), *International Union of Geological Sciences Manual of Standard Methods for Establishing the Global Geochemical Reference Network*. IUGS Commission on Global Geochemical Baselines, Athens, Hellenic Republic, Special Publication, 2, 27–39.
- Salminen, R., Tarvainen, T., Demetriades, A., Duris, M., Fordyce, F. M., Gregorauskiene, V., Kahelin, H., Kivisilla, J., Klaver, G., Klein, H., Larson, J. O., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mjartanova, H., Mouvet, C., Odor, L., Ottonello, G., Paukola, T., ... Williams, L. (1998). *Foregs Geochemical Mapping Field Manual (1st ed.)*. Geological Survey of Finland.
- Salminen, R., Batista, M.J., Bidovec, M., Demetriades, A., De Vivo, B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A., Jordan, G., Klaver, G., Klein, P., Lis, J., Locutura, J., Marsina, K., Mazreku, A., O'Connor, P.J., Olsson, S.Å., Ottesen, R.T., Petersell, V., Plant, J.A., Reeder, S., Salpeteur, I., Sandström, H., Siewers, U., Steenfelt, A. & Tarvainen, T., 2005. *FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1: Background Information, Methodology and Maps*. Geological Survey of Finland, Espoo, 526 pp.; http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/map_compare.html
- Santos, C.C., 2014. *Mobilidade de elementos químicos no perfil de solo e seu controle na prospecção geoquímica: aplicação na região de Santa Maria da Vitória, BA*. xi, 121 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências)— Universidade de Brasília, Brasília.
- Santos, C.C.; REIS, C., 2021. *Geologia e recursos minerais da Folha Santa Maria da Vitória – SD.23-X-C-II: escala 1:100.000, estado da Bahia*. CPRM, Salvador
- Santos, E.S.; Abreu, M.M.; Macías, F., 2019. Rehabilitation of mining areas through integrated biotechnological approach: Technosols derived from organic/inorganic wastes and autochthonous plant development. *Chemosphere* 224: 765-775.
- SEGEMAR, 2001. *Normativa para la Carta Geoquímica de la República Argentina*. Programa Nacional de Cartas Geológicas y Temáticas de la República Argentina. 26 p. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Sector Geoquímica. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/4128>

- SEGEMAR, Carta Geoquímica Barreal, Carta Geoquímica de la República Argentina, 2018. Serie Contribuciones Técnicas de Geoquímica N° 115. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2886>
- SEGEMAR. Instituto de Geología y Recursos Minerales, 2021. Estudio Geoambiental de Base en la Isla Grande de la Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur. 520p.
- SERNAGEOMIN, Portal Geológico Minero GEOMIN, Chile. <http://portalgeo.sernageomin.cl/Visor/>
- Servicio Geológico Colombiano, Universidad Nacional de Colombia, 2014. Plan detallado de trabajo. Convenio de cooperación No. 014-2013. Caracterización metalogenética de zonas de interés para exploración mineral, en áreas estratégicas en los andes colombianos.
- Servicio Geológico Colombiano, 2018. Mapeo Geoquímico de Baja Densidad en Colombia – Línea Base Geoquímica Global. Informe Inédito
- Servicio Geológico Colombiano, 2021. Protocolo de entrega de información de campo. Agosto.
- SGB-CPRM, Geo-Portal Web. Brasil. <https://geoportail.cprm.gov.br/portal/home/>
- SGC, Colombia. Portal Web del Servicio Geológico de Colombia. <http://sgcolombiano.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8ec81e5dcf2b441ab04617322e7fbd82>
- SGM, Carta Geoquímica por Zn. Servicio Geológico Mexicano. <https://www.gob.mx/sgm/articulos/descarga-las-cartas-impresas-editadas-por-el-sgm-70622?idiom=es>
- Sheppard D. , G.C. Claridge I.B Campbell. Metal contamination of soils at Scott Base, Antarctica. Applied Geochemistry, Volume 15, Issue 4, 1 May 2000, Pages 513-530
- Simón, A., 2006. Aseguramiento y Control de la Calidad en la Exploración Geológica. AMEC Internacional (Chile) S.A., Internal R, 10.
- Simon, A., & Gosson, G., 2008. Considerations on quality assurance/quality control and sample security. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, May, 135–140.
- Simón, A., & Gosson, G., 2012. CIM Bulletin September / October 2007, Volume 2 No. 6 Quality control reporting requirements by the mining industry CIM Bulletin September / October 2007, Volume 2 No. 6. 2(6), 2–4.
- Sinclair, A.J., 1976. Application of Probability Plots in Mineral Exploration, Association of Exploration Geochemists Special Publication 4.
- Sinclair, J., 1989. A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited. Journal of Geochemical Exploration (41). 1 -22 p.
- Smith AY, Armour-Brown A, Olsen H, Lundberg B, and Niesen PL (1976) The role of geochemical prospecting in phased uranium exploration. A case history. In: IAEA (ed.) Exploration for Uranium Deposits, IAEA-SM-208/51, pp. 575–599. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Stanley, C.R., 1987. PROBLOT, An Interactive Computer Program to Fit Mixture of Normal (or Log normal) Distribution with Maximum Likelihood Optimization Procedures, Association of Exploration Geochemists Special Volume 14, 1 diskette.
- Strahler, A., 1952. Hypsometric (area-altitud) analysis of erosional topography. 11. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63)
- Strahler AN., 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: Chow VT (ed.)

- Handbook of Applied Hydrology: A Compendium of Water-Resources Technology, pp. 39–76. New York: McGraw-Hill Book Co, Section 4.
- Suárez, J., 2019. Big data, algoritmos e inteligencia artificial, ¿El futuro de la exploración geológica en Perú?, Instituto de ingeniero de minas del Perú. 4 p.
- Sulbarán, D., 2012. Análisis bivariados de datos: Un resumen para el curso de estadística II. Universidad Central de Venezuela. 49 p.
- Sutherland D., 2011. Soil Gas Hydrocarbons: An Organic Geochemistry that Detects Hydrocarbon Signatures in Surficial Samples to Locate and Identify Deeply Buried Targets. Search and Discovery Article 40682.
- Turekian, K. K. & Wedephol, K. H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. Geol. Soc. Amer. Bull., 72, 2, pp. 175-192.
- Turel, A. "Geoquímica". En: Cardó, R., I.N. Díaz, J. Catnich, V. Litvak, C. Marquetti y A. García Mestre, 2009. Carta Minero- Metalogenética 2969 – III Malimán. Provincia de San Juan. IGRM, SEGEMAR, Boletín N° 355. Buenos Aires. <http://repositorio.segemar.gob.ar/handle/308849217/311>
- Turel, A y H. de la Vega. "Leveling" de datos de Pb de la Carta Geoquímica San Antonio de los Cobres, Salta y Jujuy, 2011. En Actas del XVIII Congreso Geológico Argentino, (Eds. Leanza, Franchini, Impiccini, Pettinari, Sigismondi, Pons y Tunik), p. 1456. Neuquén, Argentina. ISSN 1851-8249
- Turiel, F. & Barrachina, D., 1987. Determinación practica de umbrales de anomalía en prospección sobre redes de drenaje. Cuaderno do Laboratorio Xeolóxico de Laxe (11). 365-373 p.
- Turkey, J. (1977)- Exploratory Data Analysis. Reading. Addison-Wesley. 711p.
- Vargas, L., 2007. Dispersión geoquímica secundaria de los principales elementos lantánidos en la cuenca de los ríos Chancay-Lambayeque. UNMSM. Tesis de grado, 169p. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/218/Vargas_rl.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vinogradov, A. P., 1962. Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the earth's crust. Geochemistry, 7, pp. 641-664.
- Xuejing, X., Xuzhan M., Tianxiang R., 1997. Geochemical mapping in China. Journal of Geochemical Exploration 60, 99-113.
- Yotova, G., Padareva, M., Hristova, M., Astel, A., Georgieva, M., Dinev, N., Tsakovski, S., 2018. Establishment of geochemical background and threshold values for 8 potential toxic elements in the Bulgarian soil quality monitoring network. Sci. Total Environ. 643, 1297–1303 p.
- Wang, X., The CGB Sampling Team, 2015. Reprint of "China geochemical baselines: Sampling methodology". Journal of Geochemical Exploration, 154, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.005>
- Wang, X., 2015. Reprint of China Geochemical Baselines: Sampling Methodology. Journal of Geochemical Exploration, 17-31. Taylor, B. C. D., & Theodorakos, P. M., 2002. Chapter A1 Rock Sample Preparation. Analytical Methods for Chemical Analysis of Geological Materials. <https://www.gov.nl.ca/nr/mines/geoscience/reports-maps/docs/of-nfld-3316/>
- Webb JS, Thornton I, Thompson M, Howarth RJ, and Lowenstein PL., 1978. The Wolfson Geochemical Atlas of England and Wales, p. 69. Imperial College of Science and Technology. Applied Geochemistry Research Group Oxford: Clarendon Press.

Webb, J., Nichol, I., Foster, R., Lowenstein, P., Howarth, R., 1973. Provisional Geochemical Atlas of Northern Ireland. Technical Communication, 60. Applied Geochemistry Research Group, Imperial College of Science and Technology, London, 1973. 350 x 275 mm., 60 pages, 31 maps, 2 overlays.

Wackernagel H., 2003. Principal Component Analysis. In: Multivariate geostatistics. Springer, Berlin, 123-136 p.

Zuo, R; Wang, J; Chen, G & Yang, M., 2015. Reprint of "Identification of weak anomalies: A multifractal perspective". J. Geochemical Exploration 154. 200-212.