



Prospección geológica para depósitos de oro a través de la integración de geoquímica, geoestadística y geología estructural en la provincia superior (Quebec, Canadá)

Trabajo de grado - modo investigación para optar por el título de geólogas

Laura Melissa Rodríguez Ramos 2162686

María Victoria Moreno Ardila 2162693

Director: Julián David De Bedout Ordoñez

Geólogo. M. Eng.



Universidad Industrial De Santander

Facultad de ingeniería fisicoquímicas

Escuela de geología

Bucaramanga

2022



Dedicatoria

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser sus hijas, son los mejores padres quienes nos han apoyado y nos han acompañado a lo largo de toda nuestra vida y nuestros proyectos.

A nuestros amigos y parejas quienes nos han regalado momentos de felicidad, crecimiento, consejos y apoyo.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.



Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos espacio de saber, conocimiento, esparcimiento y sabiduría durante nuestra formación profesional.

A nuestro director Julián David de Bedout Ordóñez por sus consejos, enseñanzas, dedicación, compañía, correcciones y apoyo, no solo durante la realización de este proyecto sino durante nuestro último año de carrera. Le agradecemos enormemente por ser un guía en nuestra vida profesional, por impulsarnos a ser mejores, por explotar nuestro potencial e inspirarnos a adentrarnos en nuevas ramas del conocimiento.

A Ricardo Valls por sus consejos, tiempo, enseñanzas, dedicación, compartirnos su conocimiento y experiencia para la realización de este trabajo y motivarnos en este grandioso campo de investigación.

A nuestros padres por su apoyo constante y aliento durante toda nuestra formación profesional, sin ellos nada de esto sería posible.

A la escuela de Geología por brindarnos el espacio educativo, el conocimiento y las herramientas para el desarrollo de nuestra formación.

A todas las personas que ayudaron de manera directa e indirecta en la realización de este trabajo, por su paciencia y gentileza.



Tabla de contenido

Resumen.....	6
Introducción	8
1. Objetivos.....	10
2.1 Objetivo General	10
2.2 Objetivos Específicos.....	10
2. Metodología.....	11
3. Marco geológico	14
3.1 Subprovincia de Minto	16
3.2 Subprovincia La Grande.....	17
3.3 Subprovincia de Opinaca	18
3.4 Estratigrafía	19
3.4.1 Subprovincia La Grande arcaico	21
3.4.2. Subprovincia Opinaca Arcaico.....	25
3.4.3 Subprovincia Minto Arcaico	27
3.4.4 Subprovincia La Grande Proterozoico	27
3.4.5 Cuaternarios.....	28
3.5. Evolución geológica.....	29
3.6 Geología estructural	31
4. Marco Teórico	32
4.1 Prospección Geoquímica.....	32
4.1.1 Anomalía geoquímica.....	33
4.2 Estadística.....	33
4.2.1 Transformaciones logratio	33
4.2.2 Estadística univariante	34
4.2.3 Estadística multivariante.....	35
4.3 Métodos de interpolación de datos.....	43
5. Resultados.....	44
5.1 Estadística univariante.....	45
5.2 Diagrama de Cajas y Bigotes	46
5.3 Matriz de correlación	48
5.4 Análisis conglomerado jerárquico.....	49
5.4.1 Dendrograma IRL	49
5.4.2 Dendrograma CRL.....	50



5.5	Biplot.....	51
5.6	Análisis de componentes principales (ACP).....	53
5.7	Análisis factorial	56
5.7.1.	ALR, varimax rotado	56
5.7.2	CRL, varimax rotado	59
5.8	Mapa Cuartiles	61
5.9	Mapa de Interpolación.....	62
5.10	Lineamientos	66
5.11	Mapa de Blancos Exploratorios	68
5.12	Mapa de La zona de Blancos exploratorios con la geología detallada.....	69
6.	Análisis de los resultados	72
7.	Conclusiones.....	82
8.	Recomendaciones	83
	Bibliografía	84



Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de localización de la zona del proyecto, el cual se encuentra ubicado en el área noreste de Canadá (tomado y modificado de SIGÉOM, 2019 y de Google Earth, 2021).	9
Figura 2. Metodología del proyecto desarrollado en 8 fases abarcando desde la elaboración del plan de proyecto de grado, hasta la interpretación de los resultados.	11
Figura 3. Mapa de provincias y subprovincias geológicas del área de estudio, incluyendo fallas principales y ubicación de las muestras de sedimentos activos usados en el proyecto (tomado y modificado de SIGÉOM, 2019).	15
Figura 4. Columna estratigráfica e ilustración de los 5 eventos arcaicos y mineralizaciones de interés en la subprovincia la grande y Opinaca. Tomada y modificada de Goutier et al., (2000). 20	
Figura 5. Diagrama resumen de los histogramas y diagramas de caja, donde se evidencia mínimo, máximo, mediana, valores atípicos. Tomada y modificada de: Navidi (2010)	35
Figura 6. 6a. Histograma con los datos crudos y 6b Histograma con los datos transformados CLR	46
Figura 7. Diagramas de cajas y bigotes que muestra la distribución de los elementos transformados previamente con CLR, los datos atípicos, la media, mediana y moda.	47
Figura 8. Dendrograma de los elementos usando la transformación ILR. El dendrograma evidencia dos grandes grupos y cuatro subgrupos. Los elementos se encuentran en un color respectivo de acuerdo con su nivel de correlación, pudiendo ser verde, amarillo, azul o magenta.	49
Figura 9. Dendrograma de los elementos transformados con CLR usando la unión de Ward y el coeficiente de correlación de distancia. Según el nivel de similitud entre los elementos se observan 4 subgrupos representados en los colores magenta, azul, verde y amarillo.	51
Figura 10. Diagrama Biplot de los elementos usados en el proyecto, donde se evidencia la agrupación elemental y sus asociaciones en 4 subgrupos en los colores amarillo, verde, magenta y azul.	53
Figura 11. Screeplot de los componentes principales vs eigenvalores. Donde se evidencia que solo se deben usar los tres primeros componentes principales.	54
Figura 12. Screeplot eigenvalores vs factores, elementos transformados con ALR y varimax rotado. Donde se muestra los factores con más información y que deben ser tomados en cuenta, en este caso son los tres primeros.	57
Figura 13. Gráfico de sedimentación (Screeplot) eigenvalores vs factores con elementos transformados por CLR usando	59



Figura 14. Mapa de probabilidad del Oro realizado por la técnica de cuartiles donde el color rojo representa la mayor probabilidad de encontrar oro hasta un 77,5% y el color azul la menor probabilidad hasta un 62%. La barra de la derecha indica los porcentajes con sus colores respectivos..... 62

Figura 15. Mapa de interpolación del componente principal 1 realizado por kriging para la asociación (Th-U-Pb) / (Rb-Mo-Mg-K-Hg-Cs-Tl-Sc). Las zonas rojas indican los lugares donde hay mayor probabilidad de encontrar esa asociación. 64

Figura 16. Mapa de interpolación del componente principal 2 realizado por método kriging para la asociación Au-W-Te-In-Hf-Mn. Las zonas de color rojo indican los lugares donde hay mayor probabilidad de encontrar esa asociación. 65

Figura 17. Mapa de interpolación del componente principal 3 realizado por método kriging para la asociación Co-Ni-Zn-Cd. Las zonas de color rojo indican los lugares donde hay mayor probabilidad de encontrar esa asociación. 66

Figura 18. Mapa de lineamientos y fallas, donde se evidencia la densidad de los lineamientos pudiendo ser alta en rojo, media en amarillo y verde baja. Las zonas de mayor densidad son donde hay más probabilidad que se encuentren canales para los flujos mineralizantes..... 67

Figura 19. Mapa de blancos exploratorios donde se evidencia las zonas con mayor probabilidad de encontrar oro, teniendo en cuenta los resultados estadísticos, la densidad de fallas y las ocurrencias de depósitos metálicos (tomado y modificado de SIGÉOM, 2019).. 68

Figura 20. Mapa geológico detallado de la zona de blancos exploratorios (tomado y modificado de SIGÉOM, 2019). 69

Figura 21. Esquema de la evolución geológica de los cinco eventos más importantes de la zona de estudio o. Imagen tomada y modificada de: Card y Ciesielski (1986); Goutier *et al.*, (2001); Caderón, (2003); Coté-Roberge, (2018). Sapin *et al.*, (2018); Ackerman *et al.*, (2022).....81



Lista de tablas

Tabla 1. Tabla de clasificación de correlación que incluye los diferentes rangos entre 1 y -1, desde los valores que no tienen correlación, hasta los que presentan una correlación perfecta. 38

Tabla 2. Tabla de los elementos 26 elementos de la zona de estudio y su coeficiente de variación. Los valores en rojo son los coeficientes de variación más altos es decir, los que pueden contener mayor información. 45

Tabla 3 Matriz de correlación de los elementos abiertos con la transformación CLR. Los valores con un nivel excelente de correlación se encuentran en color rojo, los que presentan un buen nivel de correlación se encuentran en naranja y los que presentan un nivel regular se encuentran en amarillo 48

Tabla 4. Componentes principales con sus respectivos eigenvalores. Los valores subrayados son los que son mayor a 0,7 y hacen parte de los componentes que se deben tener en cuenta. 55

Tabla 5. Elementos transformados con ALR, usando análisis factorial varimax rotado. Los valores mayores a $\pm 0,7$ se encuentran subrayados ya que son los que deben ser tomados en cuenta en los factores. 58

Tabla 6. Elementos transformados con CLR, factores varimax rotados. Los valores mayores a $\pm 0,7$ se encuentran subrayados ya que son los que deben ser tomados en cuenta en los factores. . 60



Resumen

Título: Prospección geológica para depósitos oro través de la integración de geoquímica, geostatística y geología estructural en la provincia superior (Quebec, Canadá) *

Autoras: Laura Melissa Rodríguez Ramos, María Victoria Moreno Ardila**

Palabras clave: Correlación, asociación, anomalía, CLR, ILR, CoDaPack

Descripción:

La Región de estudio se encuentra ubicada en la provincia geológica Superior en Quebec, en el área de Bahía James; comprende 3 subprovincias entre las cuales se encuentran las subprovincias de Minto, La Grande y Opinaca. A partir de los datos abiertos del gobierno canadiense, especialmente del SIGEOM (Sistema de Información Geominera de Quebec), se tomaron los datos de sedimentos activos que fueron tratados estadísticamente. Tres transformaciones se aplican para abrir el sistema de datos: transformación logratio aditiva (ALR), transformación logratio centrada (CLR) y transformación logratio isométrica (ILR) a través del software CoDaPack ([Aitchison, 1986](#); [Egozcue et al., 2003](#)).

A partir de los datos transformados se realizaron distintos análisis estadísticos como el diagrama de cajas y bigotes, la matriz de correlación, el análisis de conglomerados jerárquico, biplot, el análisis de componentes principales, análisis factorial, para finalmente realizar el mapeo de cuartiles que determina las áreas con mayor probabilidad de encontrar depósitos de oro. Además, se realizó el respectivo análisis de lineamientos de la zona, y se encontró que en la región de estudio los yacimientos reportados se asocian a zonas de cizalla.

En base a los resultados de los diferentes análisis estadísticos y el análisis estructural se determinaron 8 blancos exploratorios, donde se estableció como elemento exploratorio el oro y los elementos indicadores (*pathfinders*) Te-W-As-Hg-In-Hf. Los blancos se ubican tanto en las unidades litológicas del grupo Yasinski, como en las intrusiones de Duncan y el grupo Laguiche, litologías que son considerada prospectables según [Goutier et al., \(2000\)](#). En estas litologías se encuentran yacimientos tipo oro orogénico, BIF o estratiformes en los niveles de óxidos silicato en Yasinski y Laguiche y venas polimetálicas asociadas a zonas de cizalla en las intrusiones de Duncan. Con lo cual se comprueba la fiabilidad de la metodología usada en el área de estudio, la cual puede ser extrapolada al territorio colombiano.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Julián David De Bedout Ordoñez. Máster de ingeniería.



Abstract

Title: Geological prospecting for gold deposits through the integration of geochemistry, geostatistics and structural geology in the Superior Province (Quebec, Canada) *

Author: Laura Melissa Rodríguez Ramos, María Victoria Moreno Ardila **

Key words: correlation, association, anomaly, CLR, ILR, CoDaPack,

Description:

The study region is in the Superior geological province in Quebec, in the James Bay area; it comprises 3 sub-provinces including the sub-provinces of Minto, La Grande, and Opinaca. From the Canadian government open data, especially from SIGEOM (Quebec Geomining Information System), active sediment data were taken and statistically treated. Three transformations are applied to open the data system: additive log transformation (ALR), centered log transformation (CLR), and isometric log transformation (ILR) through the CoDaPack software ([Aitchison, 1986](#); [Egozcue et al., 2003](#)). From the transformed data, different statistical analyses were carried out, such as box plot, correlation matrix, cluster analysis, biplot, principal component analysis, factor analysis, and finally quartile mapping to determine the areas with the highest probability of finding gold deposits. In addition, the respective lineament analysis of the area was carried out, since in the study region the reported deposits are associated with shear zones.

Based on the results of the different statistical analyses and the structural analysis, 9 exploratory targets were determined, where gold was established as exploratory element and Te-W-As-Hg-In-Hf as pathfinders. The targets are located in the lithological units of the Yasinski group, as well as in the Duncan intrusions and the Laguiche group, lithologies that are considered prospective according to [Goutier et al., \(2000\)](#). In these lithologies, orogenic gold, BIF or stratiform deposits are found in the silicate oxide levels in Yasinski and Laguiche and polymetallic veins associated with shear zones in the Duncan intrusions. This proves the reliability of the methodology used in the study area, which can be extrapolated to the Colombian territory.

* Degree Work

** Faculty of physic-chemical engineering. School of Geology. Director: Julián David De Bedout Ordoñez. Geologist. M. Eng.



Introducción

El reconocimiento de anomalías geoquímicas y el tratamiento estadístico son unas de las tareas más importantes en la exploración minera, y son útiles para identificar áreas de prospección económica (Xiao *et al.*, 2012; Rowan *et al.*, 2003). Actualmente, el descubrimiento de un depósito depende no solo de una técnica sino de un conjunto de tecnologías y campos de conocimiento, que incluyen desde las investigaciones geológicas hasta la prospección geoquímica, geofísica, machine learning, estadística y teledetección (Rigol, 2000).

Este trabajo tiene como objetivo identificar posibles blancos para la exploración a través de una combinación de métodos que integran la geoquímica, estadística, análisis de lineamientos y métodos de interpolación. Las condiciones estructurales y geoquímicas del depósito aseguran su continuidad en el área, lo que significa una contribución importante para futuros proyectos de exploración. Este estudio se puede utilizar para aumentar el futuro potencial minero en la región, lo que podría brindar una oportunidad importante para el desarrollo económico. Asimismo, la metodología usada se podría extrapolar a Colombia, no solo para proyectos de exploración minera, sino para avanzar en la protección ambiental y la hidrogeoquímica (Lin *et al.*, 2014; Quino, 2017).

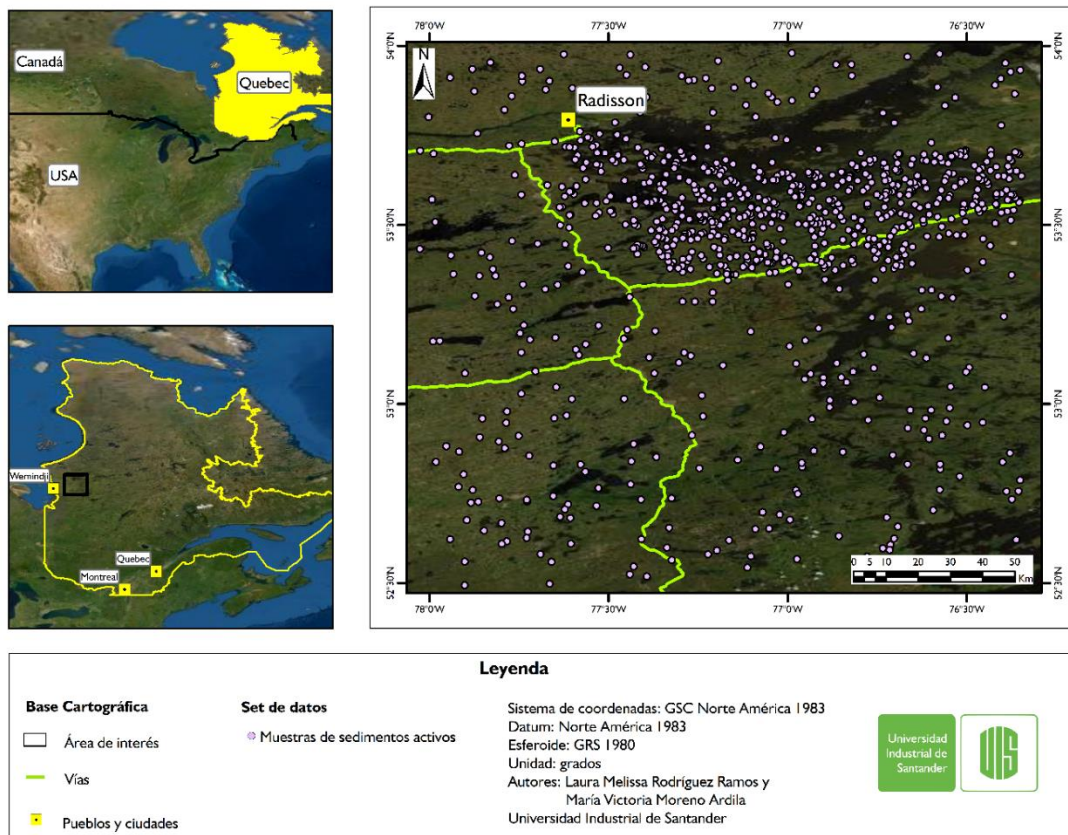
Explorar patrones geoquímicos basados en análisis de datos estadísticos es una forma conveniente y efectiva de mejorar nuestra comprensión de las características geoquímicas del área de estudio dada (Sun *et al.*, 2016; Wang, Zuo y Caers, 2017). Se aplicaron diversas técnicas estadísticas para analizar la relación entre variables y, por tanto, proporcionar información para la exploración minera (Khorasanipour, Tangestani y Naseh, 2011).

El área de estudio se encuentra ubicada al este de Canadá, en la provincia de Quebec, en la provincia geológica superior, al suroeste del área sobre cratones arcaicos, los cuales son fuentes importantes de oro (**Ver Figura 1 y 2**).

Según [Robert et al., \(2005\)](#) la provincia superior produjo 8500 toneladas métricas de oro, y presenta una complejidad geológica muy alta debido a los múltiples eventos deformativos que ha sufrido además de la superposición de eventos geológicos, no obstante, estos cratones tan complejos siguen teniendo prospectos por descubrir ([Robert et al., 2005](#) y [Robert et al., 1997](#) en [Mercier-Langevin et al., 2012](#)). Las coordenadas utilizadas en este proyecto corresponden a GCS Norte América 1983 y las capas fueron tomadas del sistema de información geominero de Quebec y el ministerio de energía y recursos naturales (2020).

Figura 1

Mapa de localización de la zona del proyecto, el cual se encuentra ubicado en el área noreste de Canadá. (tomado y modificado de SIGÉOM, 2019 y de Google Earth, 2021).





1. Objetivos

2.1 Objetivo General

Realizar la prospección geológica para depósitos de oro a través de la integración de geoquímica, geoestadística y análisis de lineamientos en la provincia superior (Quebec, Canadá).

2.2 Objetivos Específicos

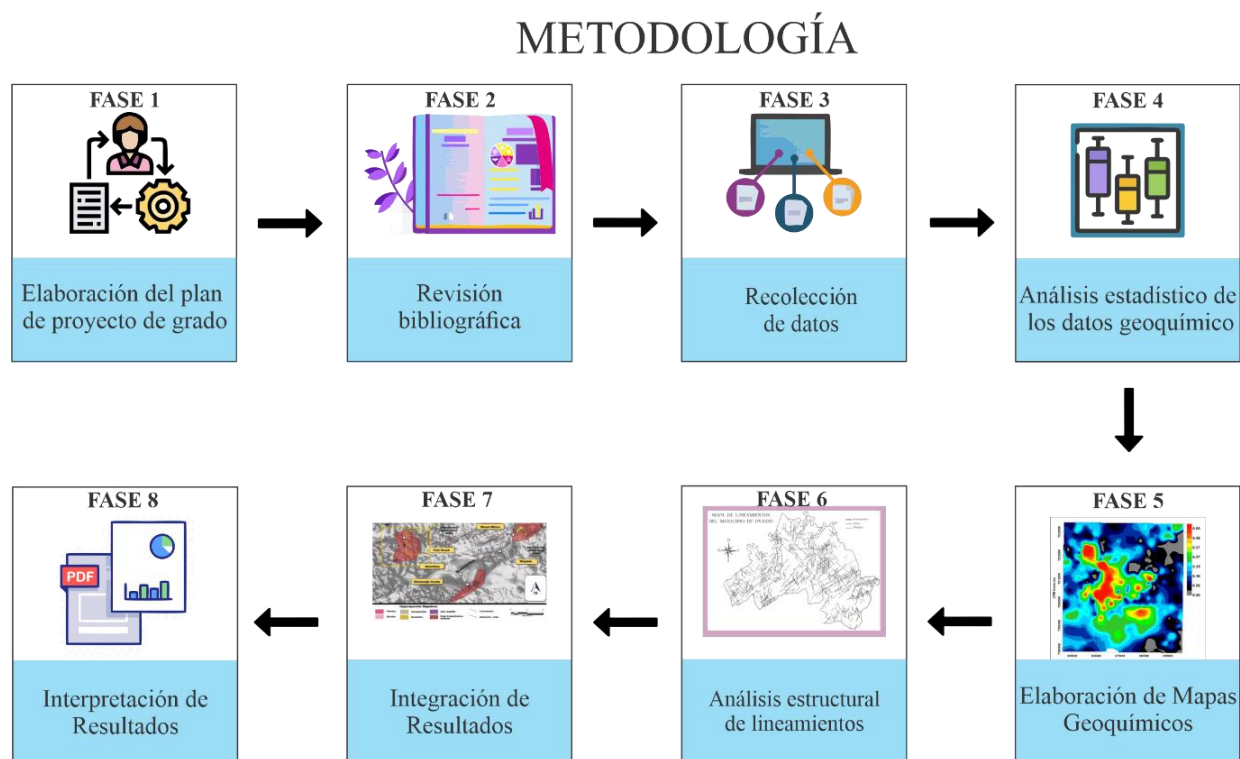
- Explorar las asociaciones entre los elementos que pueden dar información del depósito.
- Establecer las posibles zonas de interés económico en la provincia de Quebec.
- Identificar las principales tendencias estructurales que controlaron las posibles mineralizaciones.

2. Metodología

El presente proyecto se llevará a cabo mediante diferentes fases para alcanzar los objetivos propuestos, en la **Figura 2** se observa el diagrama de flujo de la metodología de este proyecto.

Figura 2.

Metodología del proyecto desarrollado en 8 fases abarcando desde la elaboración del plan de proyecto de grado, hasta la interpretación de los resultados.



Fase 1. Elaboración del plan de proyecto de grado

La primera fase de la metodología consiste en la elaboración del plan de proyecto de grado donde se define el tema, objetivos, la metodología, además del planteamiento del cronograma de actividades junto con la proyección presupuestal.



Fase 2. Revisión bibliográfica

La segunda fase del proyecto corresponde a la revisión bibliográfica del marco geológico y de los fundamentos teóricos para el desarrollo del proyecto tales como la geoquímica de sedimentos activos, el estudio estadístico y los análisis de lineamientos.

Fase 3. Recolección de datos

La tercera fase del proyecto corresponde a la recolección de datos tanto geológicos como geoquímicos. Estos datos son libres, abiertos y gratuitos, y se obtienen en el SIGÉOM (Système d'information géominière du Québec, o en español sistema de información geominero de Québec). Los datos de sedimentos activos de arroyos fueron recogidos en diversas campañas de exploración geoquímica desde el año 1957 hasta el 2018, posteriormente fueron examinados en los laboratorios correspondientes por diferentes métodos analíticos como espectrometría de absorción atómica, colorimetría, cromatografía. El SIGÉOM permite la descarga gratuita de estos datos entregados por los laboratorios, así como de la geología, dominios estructurales, fallas, lineamientos, contactos geológicos, pliegues, entre otros.

Fase 4. Análisis estadístico de los datos geoquímicos

La cuarta fase corresponde al análisis estadístico, donde después de descargar los datos geoquímicos crudos de la zona de estudio, se deben eliminar los datos censurados (menos del límite de detección). Esto se hace sustituyendo estos datos por 0,5 veces el límite de detección (Grunsky & Smee, 1999; Carranza, 2011). Cuando más del 30% de los datos sea menor al límite de detección, este elemento se elimina ya que podría generar ruido.

Debido a que en la naturaleza los eventos geológicos no suelen tener una distribución gaussiana, es necesario realizar transformaciones logarítmicas, las cuales son de gran utilidad para



tratar los efectos de cierre, eliminar las relaciones espurias y de este modo, realizar cualquier tipo de análisis estadístico. (Reimann & Filzmoser, 2000). En este trabajo se emplea la transformación logratio isométrica (IRL), centrada (CRL) y aditiva (ARL) a los datos crudos (Aitchison, 1986, Egozcue *et al.*, 2003), previo a aplicar tratamientos estadísticos. Los datos geoquímicos ya abiertos se analizan mediante el análisis de componentes principales, análisis clúster, la matriz de correlación, análisis factorial y diagramas biplot, de los cuales se determinan las asociaciones elementales o factores que se encuentran en el área de estudio. Los grupos de esta relación pueden representar actividad hidrotermal o evidencias de la mineralización en el área de estudio (Lin *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2018). La profundización y aplicación de la geoestadística se realiza mediante los softwares Excel, codapack, Qgis y la prueba gratis de Minitab.

Fase 5. Mapa geoquímico realizado por métodos de interpolación de datos

La quinta fase consiste en el mapeo geoquímico de los elementos más representativos y con mayor correlación hallados en la fase anterior, así como los mapas de los componentes principales. Estos mapas se realizan por medio de la técnica de cuartiles, esta consiste en que, una vez extraídos los factores de los diferentes métodos estadísticos (análisis factorial, biplot, análisis clúster) se seleccionan los factores que contenga el elemento de interés en cada método. Cada factor está compuesto por un grupo de elementos que debe ser sumado en cada caso respectivamente, una vez culminado el paso anterior se sacan los cuartiles 2 y 3, este resultado se somete a una prueba lógica donde la suma de los elementos transformados del factor correspondiente, si son mayores al cuartil 3 se califica como un 5 si es mayor al cuartil 2 se pone 4 y si es menor se le asigna 3, esto con el fin de obtener un número entero que pueda ser representado en términos de porcentaje. Posteriormente, se debe sumar la prueba lógica obtenida de cada factor, se multiplica por 100 y se divide por el número de factores contengan el elemento



de interés por mapear ([Comunicación personal, Valls, 2021](#)). Posteriormente se interpolan los datos con el método que mejor se ajuste, en este caso kriging, para la identificación del área con mayor interés, esta fase se ejecuta por medio del software Qgis.

Fase 6. Análisis estructural de lineamientos

La sexta fase consiste en el desarrollo del análisis estructural del área por medio de un estudio de lineamientos donde se trazan las estructuras en un modelo digital de elevación y se localizan los lugares en que se interceptan los lineamientos para determinar las áreas con mayor posibilidad de presentar mineralizaciones de interés económico.

Fase 7. Integración de resultados

La séptima fase se basa en la realización de un mapa de posibles blancos de exploración minera. Este se realiza mediante la integración de los diferentes resultados obtenidos en las fases anteriores y se ejecuta por medio del software Qgis.

Fase 8. Interpretación de los resultados

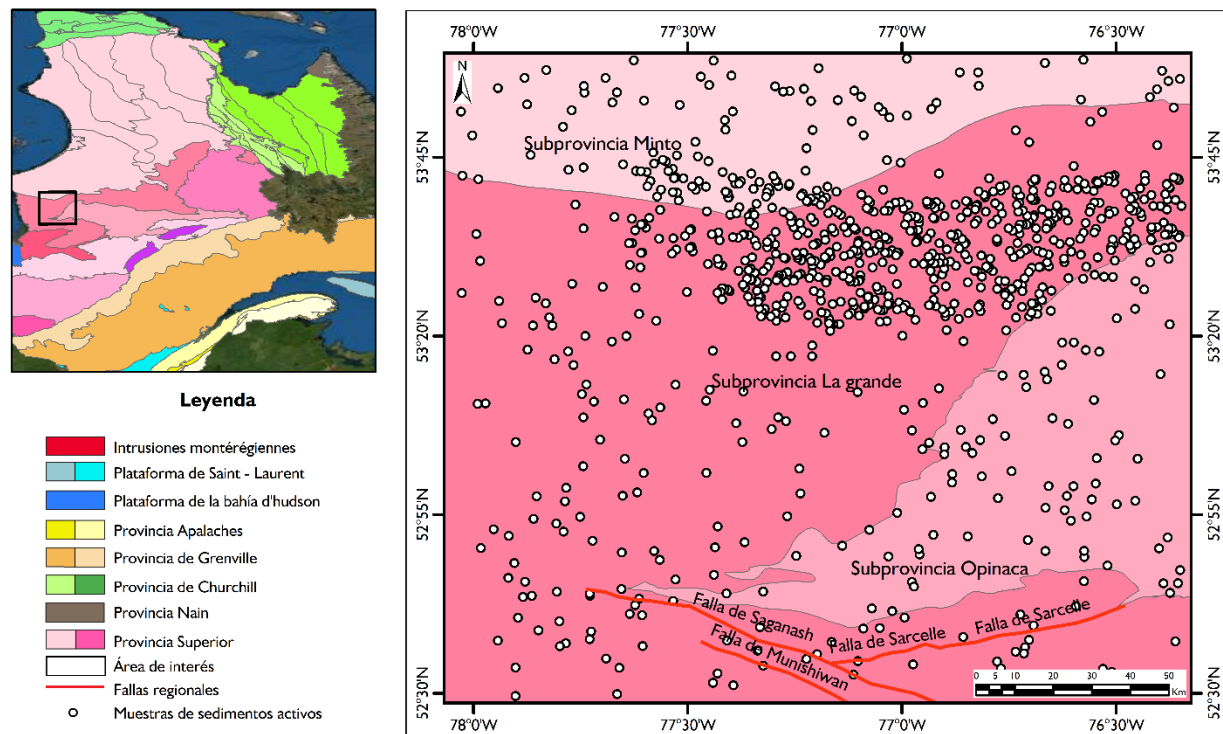
La octava fase consiste en la interpretación de los resultados y sus respectivas conclusiones. En esta fase se verifica el cumplimiento de los objetivos y se elabora el documento que compila la información desarrollada a lo largo del proyecto dónde se evalúa el potencial minero en el área de estudio. Finalmente, este trabajo es sustentado y verificado ante los evaluadores asignados por la escuela de geología de la universidad Industrial de Santander.

3. Marco geológico

La zona de estudio se encuentra ubicada en la provincia geológica Superior en Quebec, Canadá. El término “Provincia Superior” fue propuesto por Gill (1949), las subdivisiones actuales son propuestas del trabajo de (Card & Ciesielski, 1986; Card, 1990; Card & Poulsen, 1998) (Ver Figura 3). La provincia Superior constituye el corazón del escudo canadiense, está constituida por el mayor cratón arcaico terrestre y cubre un área de aproximadamente 1.400.000 km², de los cuales más de 740.000 km² se encuentran en Quebec (Hocq, 1994). La Provincia Superior se subdivide en 19 subprovincias, ocho de las cuales están reconocidas en Quebec. El SIGÉOM (Sistema de Información Geomínica de Quebec) reconoce cuatro tipos de subprovincias: metasedimentarias, metamórficas, vulcano-plutónicas y plutónicas. El área de estudio está constituida por 3 subprovincias: Minto, La grande y Opinaca (Ver Figura 3).

Figura 3.

Mapa de provincias y subprovincias geológicas del área de estudio, incluyendo fallas principales y ubicación de las muestras de sedimentos activos usados en el proyecto (tomado y modificado de SIGÉOM, 2019).





3.1 Subprovincia de Minto

La subprovincia de Minto fue descrita originalmente por [Card & Ciesielski \(1986\)](#) como un terreno gnéisico caracterizado por un alto grado de metamorfismo. Sin embargo, el trabajo cartográfico realizado por el Servicio Geológico de Canadá ([Percival & Card, 1994](#); [Percival et al., 1995, 1996 & 1997a](#)) y el del Departamento en el marco del Programa Extremo Norte han demostrado que se constituye esencialmente de rocas plutónica Arcaicas ([Simard et al., 2008](#)).

Estas rocas ígneas, de composición félsica a ultramáfica, están más o menos foliadas y han conservado sus estructuras originales en diversos grados. Las rocas plutónicas félsicas son las más comunes y extendidas, comprende tonalitas (40%), granitos (20%), granodioritas (15%), charnoquitas (15%) y, más raramente, monzonitas y sienitas (<1%). Suelen aparecer en capas alargadas que definen el estilo estructural predominante de la región. Pequeños plutones circunscritos por rocas dioríticas, gabroicas y ultramáficas representan menos del 2% del lecho rocoso.

Las rocas metavolcánicas y metasedimentarias representan menos del 10% de todas las rocas arcaicas, las cuales forman unidades lenticulares aisladas o cinturones cortados y discontinuos alojados dentro de las masas intrusivas. Los cinturones mejor conservados pueden alcanzar hasta 10 km de ancho y 120 km de largo ([Leclerc, 2008](#)). Esta subprovincia también tiene rocas sedimentarias paleoproterozoicas de la Formación Sakami que se depositó en discordancia con las rocas de la Subprovincia de Minto y forman pequeños paquetes de roca aislados, a partir de una datación K-Ar obtenida de micas contenidas en una arenisca, la formación Sakami indica una edad de sedimentación anterior a 2230 Ma ([Clark, 1984](#)).



También se encuentra una docena de enjambres de diques Proterozoicos de diferente orientación cortando las rocas arcaicas de Minto ([Buchan & Ernst, 2004](#); [Maurice, 2008](#)). Además, un enjambre formado por un centenar de diques de lamprófidos y carbonatitas ocupan la parte central de la región del lago Aigneau, la datación realizada en dos diques de carbonatita reveló edades de 1932 Ma y 1941 Ma ([Simard *et al.*, 2008](#)).

3.2 Subprovincia La Grande

La subprovincia La grande está situada en el centro-este de la Provincia Superior de Canadá ([Pitacairn *et al.*, 2019](#)) está compuesta por secuencias multi-deformadas de rocas volcano-sedimentarias y plutónicas del Arcaico ([Houlé *et al.*, 2015](#)). Al norte, se encuentra dominada por rocas plutónicas y gnéicas, y al sur por una secuencia volcanosedimentaria ([Goutier *et al.*, 2002](#)). Además, se caracteriza por presentar cinturones de rocas verde angostos, sinuosos, parcialmente interconectados, rodeados por voluminosas rocas graníticas ([Champigny y Neiminem, 2021](#)). Es importante destacar que la mayoría de las rocas están metamorfoseadas de facies esquistos verdes a anfibolitas ([Goutier *et al.*, 1999](#)).

El Complejo Langelier se interpreta como la base del basamento. Se encuentra formado por un gneis tonalítico, una diorita granoblástica asociada a un gneis y la última subunidad corresponde a una tonalita rica en hornblenda y biotita foliada a gnéica ([Goutier *et al.*, 1998](#); [1999](#)). Las rocas volcánicas y sedimentarias se dividen en bandas de varios kilómetros de longitud separadas por las rocas del Complejo Langelier, las fallas y las tonalitas más jóvenes. La base de la secuencia (Fm. Apple) está compuesta por cuarzoareniscas y conglomerado monogenético de pirita-uranio. Se ha observado una inconformidad erosiva entre la Formación Apple y los gneises del Complejo Langelier. El Grupo Yasinski, que recubre la Formación Apple, se compone principalmente de basaltos, andesitas y formaciones de hierro.



Se intercalan bandas de arenisca, conglomerado poligenético y algunas rocas volcánicas félsicas. Una dacita del Grupo Yasinski ha sido datada en $2732 \pm 8/-6$ Ma ([Goutier et al., 1998i](#)). Los volcánicos de Yasinski están recubiertos por areniscas y conglomerados poligénicos (Fm. Ekomiak) ([Goutier et al., 2000](#)). La secuencia volcano-sedimentaria muestra la evolución desde un margen continental o rift hasta un entorno marino más profundo. Las rocas sedimentarias superiores muestran el levantamiento y la erosión de las masas rocosas. ([Goutier et al., 2000](#))

Los últimos eventos magmáticos del Arcaico en la región son el emplazamiento de lamprófiros, plutones ovoides (plutón Tipitipisu, sienita del lago Bruce, granito del lago Taylor, datados en 2699 ± 4 Ma; [Goutier et al., 1998g](#)) y un plutón tectónico tardío asociado a pegmatitas (Granite du Vieux-Comptoir, 2618 ± 2 Ma). ([Goutier et al., 1998g](#)).

3.3 Subprovincia de Opinaca

La Subprovincia de Opinaca es una subprovincia metasedimentaria y plutónica ubicada en el centro de la Provincia Superior y en el corazón del territorio de Eeyou Istchee Baie-James, en Quebec. Se encuentra entre las subprovincias vulcano-plutónicas de La Grande y Opinaca (**Ver Figura 3 y 4**). La subprovincia de Opinaca está formada por un gran conjunto de paragneis y migmatitas derivadas de grauvacas feldespáticas. ([SIGEOM, 2018](#))

Este complejo metasedimentario, puede alcanzar algunos kilómetros de espesor y forma el Complejo Laguiche y se extiende por casi toda la superficie de Opinaca. Las rocas metasedimentarias de Laguiche están compuestas principalmente por paragneis, metatexitas y diatexitas. Estas rocas contienen de 20 a 50% de composición tonalítica o granítica movilizadas y se caracterizan por una franja migmatítica bien desarrollada ([Bandyayera et al., 2010](#)).



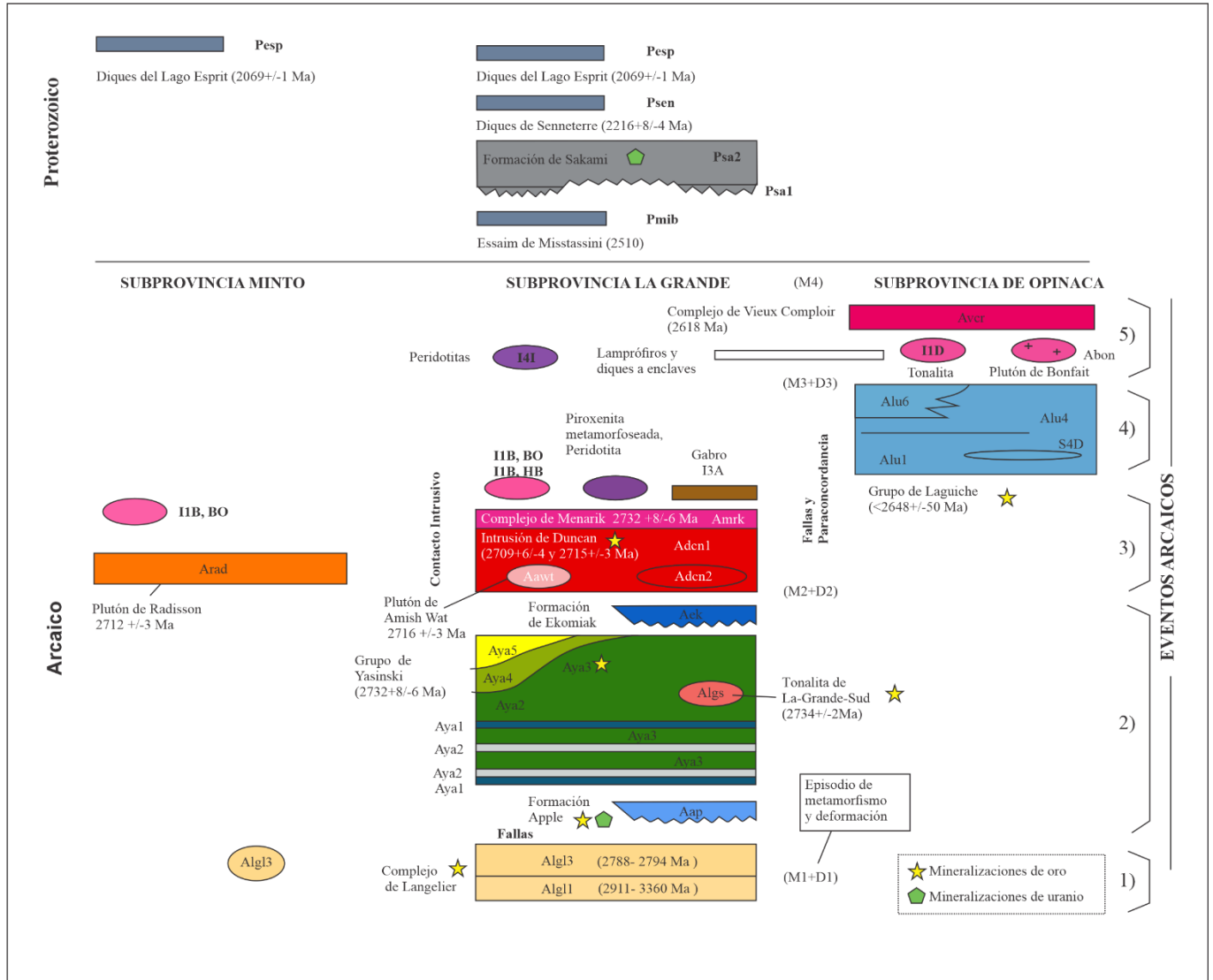
En general, la Subprovincia de Opinaca muestra un metamorfismo creciente hacia el sur a partir de su contacto con la Subprovincia de La Grande. El metamorfismo cambia de la facie de anfibolita media a superior y alcanza las facies granulita con la aparición de hiperstena en la mayoría de las rocas detríticas. La subprovincia de Opinaca corresponde a los restos de una gran cuenca sedimentaria, aunque poco se sabe sobre la edad de sedimentación. Se obtuvo una edad máxima de deposición de sedimentos hace 2721 Ma en circones detríticos de la Formación Mercator ([Wodicka *et al.*, 2009](#)).

3.4 Estratigrafía

En este capítulo se examinará la estratigrafía del área de estudio en las subprovincias de La Grande y Opinaca, de las unidades litológicas comprendidas desde el arcaico hasta el proterozoico y algunos sedimentos cuaternarios, haciendo especial énfasis en las unidades litológicas más importantes o con algún tipo de interés económico. En las unidades arcaicas de la subprovincia La Grande se encuentra el complejo Langelier, la formación Apple, el grupo Yasinski, la Tonalita la Grande Sud, la formación Ekomiak, las intrusiones de Duncan, algunas unidades litológicas con poco estudio como I1B, BO, HB, piroxenitas, gabros, lamprófidos y diques en enclaves. y en las unidades arcaicas de la subprovincia de Opinaca se encuentra el grupo Laguiche, Lamprófidos y diques en enclaves, tonalitas, el plutón de Bonfait y el complejo de Vieux Comptoir. Finalmente, las unidades proterozoicas de la subprovincia La Grande comprende Essaim Misstassini, la formación Sakami y los diques del Lago Esprit. (**Ver Figura 3 y 4**)

Figura 4

Columna estratigráfica e ilustración de los 5 eventos arcaicos y mineralizaciones de interés en la subprovincia la grande y Opinaca.(tomada y modificada de Goutier et al., (2000)).





3.4.1 Subprovincia La Grande arcaico

3.4.1.1 Complejo Langelier (lgl)

Este complejo fue definido por [Goutier et al., \(1999b\)](#) y comprende 3 unidades litológicas: gneises tonalíticos y dioríticos (Alg1), una tonalita foliada (A1g13) y una unidad mixta de tonalita y gneis (Alg1), (**Ver Figura 4**). Los gneises (Alg1) constan de bandas milimétricas a centimétricas, de color gris a blanco, de composición tonalítica, que se alternan con bandas máficas, ricas en hornblenda y biotita, probablemente producidas por segregación mineral.

El gneis diorítico es de color gris más oscuro a verdoso, de grano medio con plagioclasa, hornblenda, biotita y algo de magnetita y epidota, con poco o ningún cuarzo. La tonalita foliada (Alg13) es una unidad importante en la región, es de grano fino, granoblástica y más raramente de grano medio. Presenta una pátina entre blanca y amarillenta, y una foliación regular con, a veces, una lineación mineral. Localmente presenta una textura gneísica. La unidad mixta de tonalita y gneis (Alg1) está compuesta de tonalita foliada con biotita y gneis tonalítico rico en biotita y hornblenda. Las variaciones litológicas eran demasiado estrechas dentro de la unidad para mostrar estas litologías de forma independiente ([Goutier et al., 2000](#)).

3.4.1.2 Formación Apple (ap)

Esta formación consiste en una secuencia sedimentaria de cuarzo areniscas y conglomerados con guijos de cuarzo, pirita y uranio, se reconoce fácilmente por su color blanco a amarillento (**Ver Figura 4**). En varios lugares, la arenisca adquiere un tono entre verde manzana y verde esmeralda relacionado con la presencia de fucsita diseminada (Cromomoscovita). Este color en particular dio origen al nombre de esta formación.



Los granos son de finos a medianos y muy grueso en algunos lugares. Se compone casi que exclusivamente de cuarzo con un pequeño porcentaje de moscovita, biotita y minerales pesados (Goutier *et al.*, 2000). (Ver Figura 4).

3.4.1.2.3 Grupo Yasinski (ya)

Este grupo consiste en una secuencia de formaciones de hierro, rocas sedimentarias clásticas y volcánicas máficas, intermedias y félsicas (Goutier *et al.*, 1998a). Este grupo se representa estratigráficamente de Aya 1 hasta Aya 5 (Ver figura 4).

Aya 1 corresponde una formación de hierro, con facies de óxido y silicato, se puede encontrar metaforfizada en una anfibolita granatífera (Goutier *et al.*, 2000; Champigny y Nieminem, 2021), consta de niveles de silicato más o menos ricos en clorita, anfíbol (grunerita), biotita y granate y de láminas milimétricos a centimétricos de magnetita diseminada a masiva. Aya 2 corresponde a una unidad de grauvacas feldespáticas y lodos, con niveles locales de formación de hierro-magnetita, las grauvacas se encuentran metamorfizadas en esquistos de biotita – actinolita (Champigny y Nieminem, 2021). La unidad Aya3 está compuesta por basaltos y andesita basáltica de afinidad toleítica (ferruginosa) y se encuentran metamorfizadas en anfibolitas foliadas. Las unidades Aya4 y Aya5 comprenden lavas y rocas piroclásticas de composición basáltica andesita-andesita y dacita-riolita, todas ellas de afinidad calcoalcalina (Rivard & Francis, 1984; Skulski *et al.* 1984; St. Seymour *et al.*, 1988; Girard, 1996; Goutier *et al.* 1998b; Legault & Simard, 1998; Fallara *et al.* 1999; Moorhead *et al.* 2000; Richer-LaFlèche *et al.* 2000) (Ver Figura 4).



3.4.1.4 Tonalita de La- Grande- Sud (lgs)

Forma un plutón de 600 m por 1500 m en la superficie, esta unidad tiene cristales de grano fino a medio, equigranular, con muy pocos minerales máficos. [Mercier Langevin \(2000\)](#) reconoció tres facies en función del grado de la alteración de la roca. La tonalita más reciente y menos alterada, en el corazón de la intrusión, es la tonalita de biotita, que se compone de 45 a 70% de plagioclasa sódica, 15 a 25% de cuarzo y 3 a 5% de biotita, el feldespato potásico está ausente o en trazas, los minerales en menor proporción son la sericita, epidota, carbonatos, clorita, leucoxeno e ilmenita. La unidad más importante en volumen es la unidad que se está alterando a clorita, donde este mineral sustituye a la biotita en la roca. La unidad más alterada es donde se encuentra la sericita y se encuentra mineralizada con sulfuros y oro, forma la parte sur de la intrusión, en el borde del contacto con los volcánicos cizallados, y tiene espesor de 50 m. La tonalita está cortada por diques de diorita y gabro, así como diques de lamprófido tardíos ([Goutier et al., 2000](#)). (Ver **Figura 4.**)

3.4.1.5 Formación de Ekomiak (ek)

[Mills \(1967\)](#) fue el primero en reconocer estas rocas sedimentarias en esta zona, y las asignó como la unidad de conglomerados de clastos graníticos (**Ver Figura 4**). Se encuentra en inconformidad con el grupo yasinki y están limitados por una gran cantidad de fallas ([Champigny y Nieminem, 2021](#)). Esta unidad, junto con la unidad de brecha volcánica se incluyen en la Formación Ekomiak, que consta de conglomerado poligénico, grauvacas lítico y formaciones de hierro. Las texturas sedimentarias observadas sugieren un entorno fluvial o aluvial ([Goutier et al., 2000](#)).



3.4.1.6 Pluton de Amisach Wat (awt)

El plutón se encuentra cerca del lago Yasinski, está formado por una fase tonalítica mayor (awt2) y una fase diorítica menor (awt1). Los contactos con las unidades adyacentes son escasos (**Ver Figura 4**). Este plutón es más joven que los volcánicos y parte de la deformación, ya que atraviesa los volcánicos cizallados y está poco afectado por la deformación. La datación de los circones de la fase tonalítica, tienen una edad de 2716 +/-3 Ma ([Goutier et al., 1998i](#)). La fase diorítica menor (awt 1) es una diorita de cuarzo con hornblenda foliada. Se diferencia de la fase tonalítica por la abundancia de hornblenda (35%), que le da una pátina verde oscura, y la menor cantidad de cuarzo. Se observan localmente epidota, biotita y clorita. La fase mayor tonalítica (Aawt2) es una tonalita de hornblenda de grano medio, masiva o ligeramente foliada, su pátina varía del verde al rosa y a veces es blanquecina. La tonalita se caracteriza por la presencia de un 3-10% de hornblenda. Las alteraciones más comunes son una ligera epidotización y hematización ([Goutier et al., 1998b](#))

3.4.1.7 Intrusiones de Duncan (dnc)

Varias rocas intrusivas han sido agrupadas bajo el nombre de "intrusiones Duncan" ([Goutier et al., 1998c](#)), son más jóvenes que las rocas sedimentarias y volcánicas de la zona y muestran un grado de deformación variable (**Ver Figura 4**). La tonalita de hornblenda-biotita (Adcn1) forma la primera unidad de las Intrusiones Duncan. La diorita hornblendica (Adcn2) forma la segunda unidad de estas intrusiones, esta corresponde a una facies más máfica de la tonalita hornblenda-biotita. Finalmente, la monzonita (Adcn3) que corresponde a la tercera unidad, es rosa y de grano medio, esta intrusión sólo está ligeramente deformada y la parte oriental de la unidad contiene diorita según [Mills \(1967\)](#).



3.4.1.8 Complejo de Menarik (mrk)

El Complejo Ígneo de Menarik fue descubierto a finales de los años 50 por Main Exploration, está ubicado en la Subprovincia La Grande, en la parte nororiental de la Provincia Superior (**Ver Figura 4**), es el Cratón Arcaico más grande y mejor conservado del mundo. Este complejo está alojado en las rocas metavolcánicas máficas de Yasinski de $2732 \pm 8/-6$ Ma y la tonalita Duncan de 2716 ± 3 Ma ([Goutier et al., 1996](#)). El Complejo Ígneo de Menarik es una de las intrusiones ultramáficas-máficas en capas más grandes encontradas en el área de Bahía James y está expuesta en un área de 2 por 3 km² con un espesor aproximado de 500 m. ([Houlé et al, S.f.](#))

3.4.2. Subprovincia Opinaca Arcaico

3.4.2.1. Grupo Laguiche (lu)

Consiste en un conjunto de metasedimentos, cortados por múltiples intrusiones de granito blanco a rosado y pegmatitas, Este complejo ya había sido reconocido por [Eade et al., \(1957\)](#) y [Eade \(1966\)](#). Posteriormente, [Fouques & Schumacher \(1979\)](#) le asignaron el nombre de "serie de Laguiche", que fue modificado a Grupo de Laguiche ([Simard 1999a](#); [Goutier et al., 2000c](#)), está compuesto principalmente por paragneiss biotíticos resultante de la transformación progresiva de unas grauvacas feldespáticas (S3D) y de lodos (S6). Algunas unidades litológicas menores pertenecen a tobas félsicas y ceniza, formaciones de hierro y conglomerados poligénicos.

La unidad principal del Laguiche (Alul) incluye las siguientes litologías: alternancia de grauvacas feldespáticas y lodos (S3D/S6), conglomerados con guijarros poligénico (S4D) y paragneises de biotita (M4, BO) (**Ver Figura 4**).



3.4.2.2 Plutón de Bonfait (Bon)

Es un plutón granítico y monzodiorítico, aflora parcialmente en las orillas del lago Bonfait. Su superficie es de unos 12 km². El plutón está en contacto intrusivo con el Grupo Laguiche (lgl) (**Ver Figura 4**). El granito es rosado y de grano medio. Se compone de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y hornblenda y biotita (15% de minerales máficos). La roca es homogénea y no está deformada. Hay frecuentes enclaves centimétricos de diorita negra. La monzodiorita y la monzodiorita de cuarzo son de color blanco a rosado y de grano medio. Se diferencian del granito por una mayor proporción de hornblenda y biotita (30% de minerales máficos) y por una menor cantidad de cuarzo, feldespato potásico y enclaves máficos negros. Las monzodioritas también son homogéneas y no están deformadas. ([Goutier et al., 2000](#)).

3.4.2.3 Suite granitique du Vieux Comptoir (vcr)

La Suite Granítica Vieux Comptoir representa un conjunto de granitos sintectónicos a tectónicos tardíos presentes en las subprovincias de La Grande, Opinaca y Opatica, (**Ver Figura 4**) de escala decimétrica a kilométrica ([Goutier et al., 2000](#), [Bandyayera et al., 2011](#)). Estas rocas se caracterizan por una estructura comúnmente pegmatítica, una composición granítica y la presencia de biotita, moscovita, turmalina y granate, estos granitos, generalmente no están deformados o poco deformados. Localmente se nota la presencia de hornblenda, berilo o espodumeno.

Esta roca generalmente corta la foliación principal y las bandas migmatíticas de los paragneis del Complejo Laguiche. Esta suite se divide en tres unidades informales que difieren entre sí en composición y estructura (vcr1, vcr2, vcr3) ([MERN, 2021](#)). La primera unidad (vcr1) es un granito de biotita, con o sin magnetita; granito de biotita-magnetita, con o sin hornblenda y



epidota, masivo a ligeramente foliado, la segunda unidad (vcr2) es un granito pegmatítico blanco; granito pegmatítico de feldespato alcalino y biotita, con o sin moscovita, turmalina, granate y berilo; granito de moscovita-granate, en bandas, comúnmente pegmatítico y finalmente la tercera unidad (vcr3) Granito de espodumenon ([MERN, 2021](#)).

3.4.3 Subprovincia Minto Arcaico

3.4.3.1 Plutón de Radisson

El plutón Radisson está compuesto principalmente por una monzodiorita homogénea de hornblenda-cuarzo con una estructura porfiritica distintiva (**Ver Figura 4**). Es de color blanco a rosado y de grano medio a grueso ([Goutier et al., 1999](#)). La roca muestra comúnmente una textura moteada en la superficie alterada causada por aglomeraciones de minerales ferromagnesianos. Se observa localmente la formación de bandas magmáticas ([Simard y Lafrance, 2011](#)). La roca es generalmente masiva a ligeramente deformada, pero puede estar foliada localmente ([Goutier et al., 2001b](#)). Además de la monzodiorita de cuarzo porfídico, el Radisson Pluton está cortado por múltiples diques graníticos de un centímetro de ancho. Estos diques son rosados, de grano fino y no porfídicos ([Goutier et al., 2001a](#)).

3.4.4 Subprovincia La Grande Proterozoico

3.4.4.1 Formación de Sakami (sa)

La formación Sakami está compuesta principalmente por arenisca, fue definida durante los trabajos de [Eade \(1966\)](#). Esta formación, cuyos estratos están ligeramente inclinados (<30°) hacia el SSE, descansa de manera inconforme sobre rocas del Arcaico (**Ver Figura 4**).



La formación Sakami consta de tres unidades (Fougues & Schumacher, 1979). La unidad basal (Psal), se compone de finos estratos paralelos de lodos verdes y rojos, intercalados con niveles de arcillas de hematites (arenisca roja) y algunos horizontes de conglomerado poligénico con guijarros de cuarzo y tonalita. La unidad media (Psa2) de la Formación Sakami está compuesta por arenisca cuarzosa y es la unidad dominante. Finalmente, la unidad superior está formada por conglomerados poligénicos, areniscas gruesas, areniscas y limos calcáreo de origen torrencial y fluvial (Fougues & Schumacher, 1979), (Ver Figura 4).

3.4.4.2 Diques del Lago Esprit (esp)

Los diques de Lac Esprit (esp), representan el gabro en forma de diques con tendencia N-S a NW-SE. El gabro es de color gris a verde oscuro, a menudo magnético y de grano fino a medio. La pátina es marrón, lo que la distingue de otros gabros metamorfoseados que tienen una pátina negra debido a los anfíboles. El gabro es localmente porfírico a glomeroporfírico con plagioclasa (2-5%) de 0,5-2 cm de diámetro. La textura subfítica es la más común de estos diques, presentan el leucoxeno. (Goutier et al, 1998b). La datación isotópica U-Pb de cristales de baddeleyita de un dique de gabro en la orilla norte del lago Ekomiak (97-JG-999), dio una edad de 2069 +/-1 Ma (Hamilton y Matthews, datos no publicados, 1998; Ernst et al., 1998).

3.4.5 Cuaternarios

La zona está parcialmente cubierta por depósitos sueltos de arena y grava del Cuaternario. Estas zonas sedimentarias no se muestran en el mapa, ya que siempre ha sido posible encontrar afloramientos y complementar la geología con datos aeromagnéticos. Se observan tres direcciones de transporte glacial en los afloramientos de la región (Goutier et al., 2000). La dirección más antigua es al NO, mientras que las otras dos son al O y al WSW (Veillette, 1995).



3.5. Evolución geológica

El primer y más antiguo evento corresponde al emplazamiento de un complejo gneísico y plutónico, denominado Complejo Langelier. La datación isotópica indica una edad de 3360 $\pm$ 7/-5 Ma y 2811 $\pm$ 2 Ma para los gneises Alg1 ([Machado, comunicación personal, 2000](#); [Mortensen & Ciesielski, 1987](#)) y 2788 $\pm$ 4/-3 Ma y 2794 $\pm$ 2 Ma para la tonalita deformada A1g13 ([Goutier et al., 1999b](#)). (Ver Figura 4 y 21).

El segundo evento coincide con una distensión cortical que conduce a la formación de cuencas locales de sedimentos maduros y a la depositación de sedimentos maduros (Ver Figura 21), unas cuarzoareniscas y un conglomerado monogénico portador de uranio (Formación Apple). Además de la depositación de una secuencia volcano-sedimentaria en la región constituida por formaciones férricas (Aya1), rocas sedimentarias clásticas (Aya2), basaltos toleíticos (Aya3), rocas volcánicas intermedias (Aya4) y volcánicas félsicas (Aya5, Grupo Yasinski: 2732 $\pm$ 8/-6 Ma; [Goutier et al., 1998a](#)). En la parte superior de esta secuencia se caracteriza por la deposición, inconforme sobre los volcánicos, de sedimentos clásticos gruesos y poligénicos (grauvacas y conglomerado) de la Formación Ekomiak (Aek). Este evento también incluye el emplazamiento de plutones contemporáneos y rocas volcánicas como la Tonalita La-Grande-Sud (lgs) hace 2734 $\pm$ 2 Ma ([Goutier et al., 2000](#)) (Ver Figura 4 y 21).

El tercer evento corresponde al emplazamiento, entre 2716 $\pm$ 3 Ma y 2709 $\pm$ 6/-4 Ma ([Goutier et al., 1998a y 1999b](#)), intrusiones como las de Duncan (Aden), el plutón Amisach Wat (awt), y el complejo Menarik (mrk), intrusiones máficas (I3A) y ultramáficas (I4B[ME]) y I4I), el plutón de Radisson (Arad, subprovincia de Bienville) y granitos de biotita (I1B, BO) o de hornblenda (I1B, HB). (Ver Figura 4 y 21).



El cuarto evento está asociado a la sedimentación de turbiditas en una gran cuenca ($<2648 \pm 50$ Ma y >2618 Ma) que corresponde a los límites de la Subprovincia de Opinaca. Estas rocas están agrupadas en el Grupo Laguiche, se componen de grauvaca feldespático transformadas en paragneiss de biotita por metamorfismo regional y conglomerado poligénico (Alu1). La parte superior de la secuencia incluye formaciones de hierro (Alu4), así como feldespáticas piroclásticas félsicas con conglomerados poligénicos (A1u6) ([Goutier et al., 2000](#)) (**Ver Figura 4 y 21**).

El quinto gran evento corresponde al emplazamiento de intrusiones más tardías que las rocas de Laguiche: una peridotita (141), una tonalita (I ID), el plutón de Bonfait (Abon), lamprófiro, diques de enclave y el Granito du Vieux Comptoir (Avcr: $2618 \pm 18/-13$ Ma y 2618 ± 2 Ma; [Goutier et al., 1999b y 2000](#)). A nivel regional, algunas de estas intrusiones cortan las rocas de las subprovincias de La Grande y Opinaca. (**Ver Figura 4 y 21**). Las rocas proterozoicas de la región corresponden a tres enjambres de diques de gabro no deformados ni metamorfoseados y a las rocas clásticas de la Formación Sakami. Los trabajos paleomagnéticos preliminares ([Ernst et al., 1998](#); [Buchan, comunicación personal, 1999](#)) indican que uno de los diques, de NNW a WNW, pertenece al Enjambre de Mistassini (Pmib: 2510 Ma), el segundo (NE a ENE) pertenece a los Diques de Senneterre (Psen: 2216 Ma), y un tercero (N a NW) los diques del Lac Esprit (Pesp: 2069 Ma). La Formación Sakami está compuesta por lodos y arenisca roja (Psal) en la base arenisca (Psal) superpuesta por una gruesa secuencia de arenita de cuarzo cuarcita (Psa2) ([Goutier et al., 2000](#)). Las relaciones transversales entre los diques y la Formación Sakami sugieren que la edad de esta formación está entre 2216 y 2510 Ma. (**Ver Figura 4 y 21**).



3.6 Geología estructural

El área de estudio sufrió tres grandes episodios de deformación en el Arcaico (D1 a D3) y han afectado a la región según [Goutier *et al.*, \(2000\)](#). El primer episodio de deformación (D1) está asociado al episodio de deformación en los gneises del Complejo Langelier que precede al emplazamiento de las tonalitas Langelier y de las rocas supracrustales (**Ver Figura 4**). El segundo evento de deformación (D2) afectó a la secuencia volcanosedimentaria (Yasinski-Ekomiak) y a las rocas del Complejo Langelier (**Ver Figura 4**). Este episodio, asociado al transporte tectónico del NNW al SSE, es responsable de las imbricaciones de la cubierta del basamento y del plegamiento a escala kilométrica. El tercer episodio (D3) está relacionado con el desarrollo de la foliación tectónica en las Intrusiones Duncan y las rocas Laguiche (**Ver Figura 4**), la lineación en estas intrusiones y la superposición de la secuencia volcánica sobre parte de los metasedimentos de Laguiche. ([Goutier *et al.*, 2000](#)).

Las estructuras proterozoicas de la región no son despreciables y están asociadas a tres sistemas frágiles. Las fallas que bordean los grabens de la región se extienden hacia el este y el oeste y están conectadas a una gran red que se extiende a lo largo de 300 km y que se interpreta como un gran sistema de deslizamiento de rumbo dextral ([Portella, 1980](#)).



4. Marco Teórico

4.1 Prospección Geoquímica

La prospección geoquímica, es una herramienta altamente útil durante la exploración minera, su aplicación permite cubrir grandes superficies de terreno en tiempos relativamente cortos y a un costo moderado ([Rodríguez, 2012](#)). Su interpretación se realiza en base a resultados de sedimentos activos de arroyo, de suelo, rocas, vegetación, agua y gases. La interpretación se basa en principios de dispersión geoquímicas primarias (exógenos) o secundarias (endógenos). Los patrones de dispersión en los datos de levantamientos geoquímicos aparecen como áreas donde la abundancia de un elemento es mayor que en las áreas circundantes, esta abundancia puede ser causada por mineralizaciones o características ambientales que causen este enriquecimiento ([Reedman, 1979](#); [Moon, Whateley, & Evans, 2006](#); [Xiao *et al.*, 2012](#); [Quino, 2017](#)). El fin último de la geoquímica es realizar una caracterización de la distribución espacial de los elementos geoquímicos de interés, detectar anomalías y encontrar las relaciones entre los elementos a través del tratamiento estadístico ([Moon, Whateley & Evans, 2006](#)). Los métodos estadísticos deben utilizarse con cautela debido a las características particulares de los datos geoquímicos, pues rara vez representan una sola población o distribución, y son producto de los diferentes procesos que han influido en su abundancia ([Kürzl, 1988](#); [Reimann & Garrett, 2005](#); [García & Moreno, 2006](#)).

Los datos geoquímicos utilizados en este trabajo fueron recolectados en muestras de sedimentos activos de arroyos por el SIGÉOM desde el año 1957 hasta el 2018 en diferentes campañas de exploración por diferentes compañías mineras y diferentes entidades. Por lo tanto, fueron examinados en los laboratorios correspondientes por diferentes métodos analíticos como espectrometría de absorción atómica, colorimetría, cromatografía; al oeste de la región norte de Quebec, Canadá.



En este trabajo se clasificarán los 28 elementos de los datos geoquímicos con el fin de caracterizar los patrones de distribución, detectar zonas anómalas de interés prospectivo y delimitar targets de exploración.

4.1.1 Anomalía geoquímica

En el ámbito de la prospección geoquímica las anomalías geoquímicas pueden indicar la presencia de una mineralización ([Reedman, 1979](#)). Estas se definen como la variación de la distribución geoquímica normal correspondiente a un área o a un ambiente geoquímico, implica un solo conjunto de valores inusuales en cuanto a la concentración de un elemento o varios elementos, con respecto al valor de fondo ([Levinson, 1973](#), [García & Moreno, 2006](#); [Matschullat et al., 2000](#)).

4.2 Estadística

4.2.1 Transformaciones logratio

Los métodos estadísticos están diseñados en el espacio euclidiano, y no pueden utilizarse directamente para el análisis de datos composicionales ya que podrían dar tanto correlaciones espurias como resultados engañosos ([Wang et al., 2014](#)). Los datos geoquímicos de sedimentos activos son datos composicionales que pertenecen a sistemas numéricos cerrados, es decir que solo contienen información relativa y son partes de un todo ([Carranza, 2011](#); [Zuo et al., 2013](#)).

En consecuencia, los datos composicionales deben abrirse y convertirse a un espacio euclidiano antes de realizar cualquier tratamiento estadístico. Las transformaciones logarítmicas son empleadas para abrir esos sistemas cerrados y entender las verdaderas relaciones entre las composiciones ([Filzmoser et al., 2012](#)).



Tres transformaciones se aplican para abrir el sistema: transformación logratio aditiva (ALR), transformación logratio centrada (CLR) y transformación logratio isométrica (ILR) (Aitchison, 1986; Egozcue *et al.*, 2003). Autores como Carranza (2011) afirman que la transformación ILR refleja la presencia de mineralización y que tiene más ventajas en datos geoquímicos que ALR y CLR (Aitchison & Egozcue, 2005). En este proyecto se utiliza el software gratuito Codapack, el cual transforma los datos automáticamente (Comas-Cufí & Thió-Henestrosa, 2011) en el cual se probaron los tres tipos de transformaciones.

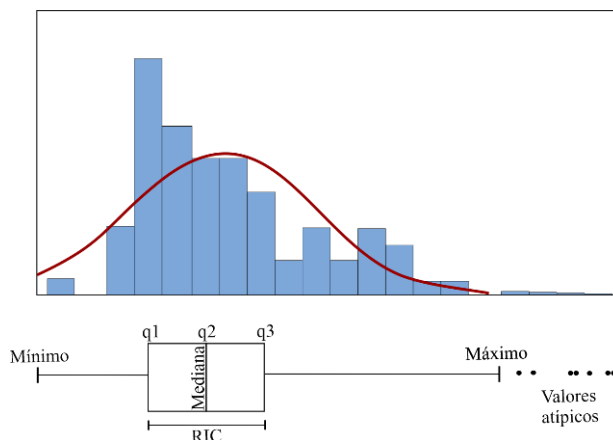
4.2.2 Estadística univariante

El primer paso para realizar el tratamiento de datos geoquímicos es transformar los datos de un sistema cerrado a uno abierto por medio de transformaciones logratio mencionadas anteriormente. De este modo se podrán aplicar diversos métodos estadísticos y obtener conocimiento acerca del comportamiento de las variables. Existen diferentes parámetros que describen de manera sintética a una población, por medio de su función, de distribución, media (background), moda, mediana, varianza y desviación estándar, valor máximo, mínimos, histogramas y diagramas de caja (**Ver Figura 5**) (Lepertier, 1969; Sinclair, 1974; Rodríguez, 2012; Diczovski, 2012).

Los diagramas de caja son representaciones gráficas de la distribución de los datos, constituye una gráfica que incluye la mediana, el primer y tercer cuartil y cualquier dato atípico (*outliers*) que se presente en una muestra (Webster & Oliver, 2007; Mrvić *et al.*, 2011). Cualquier punto que está a más de 1.5IQR por encima del tercer cuartil o por debajo del primer cuartil, es considerado como un dato atípico (Borradaile, 2003; Navidi, 2010).

**Figura 5.**

Diagrama resumen de los histogramas y diagramas de caja, donde se evidencia mínimo, máximo, mediana, valores atípicos. Tomada y modificada de: Navidi (2010)



4.2.3 Estadística multivariante

Cuando en cada elemento de la población se mide simultáneamente un conjunto de variables estadísticas se dice que se está midiendo una variable estadística multivariante (Kurinnaya *et al.*, 2011; Peh *et al.*, 2010). La estadística multivariante es muy útil en el tratamiento de datos geoquímicos debido a que permite determinar el tipo de relación existente entre las variables, la estructura de los datos y su relación con los procesos geológicos (Feltrin & Bertelli, 2019). No obstante, los datos geoquímicos no se comportan en una distribución normal, es por ello, que diversos autores recomiendan realizar transformaciones logarítmicas ALR, CLR, ILR previo a cualquier análisis multivariado (Sun *et al.*, 2009; Khorasanipour *et al.*, 2011, Carranza, 2011).



4.2.3.1 Correlación entre elementos

La correlación es un tipo de asociación entre dos variables y su objetivo es identificar el tipo de relación o asociación entre las variables, su dispersión y si existen datos que se comportan de manera atípica o no se ajustan al comportamiento del resto de datos (outliers). Se dice que dos variables están asociadas cuando una variable da información acerca de la otra, por consiguiente, dos variables se correlacionan cuando muestran una tendencia creciente o decreciente.

La relación de los elementos o de los grupos de elementos se puede realizar por medio de gráficos de dispersión, una matriz de correlación o dendrogramas ([Borradaile, 2003](#); [Navidi, 2006](#); [Khorasanipour et al., 2011](#)).

4.2.3.2 Coeficiente de correlación

Para establecer la covariación conjunta de dos variables y establecer comparaciones entre distintos casos se usa tanto el coeficiente de correlación lineal de Pearson como el coeficiente de correlación no paramétrica de Spearman. Dado que los elementos de la tierra presentan distribuciones no gaussianas es aconsejable transformar logarítmicamente las variables o usar la correlación de Spearman ([Rigol, 2000](#); [Borradaile, 2003](#); [Davis, 2002](#)).

El coeficiente de correlación de lineal de Pearson describe la relación entre dos características, sirve para cuantificar tendencias lineales, describir la intensidad de la relación lineal entre dos conjuntos de variables y se denota como r . Este coeficiente se caracteriza por ser muy sensible a valores atípicos y para usarlo en datos geoquímicos es necesario contar con mínimo 30 datos y aplicarles una transformación logarítmica ([Rigol, 2000](#); [Carranza, 2011](#); [Quino, 2017](#)).



El grado en que los puntos en un diagrama similar tienden a agruparse alrededor de una recta refleja la fuerza de la relación lineal entre x e y . El coeficiente de correlación entre dos variables puede definirse como la covarianza entre sus dos variables tipificadas y se expresa de la siguiente manera:

$$r_{x,y} = S_{u,v} = \frac{S_{\frac{x-\bar{x}}{S_x}, \frac{y-\bar{y}}{S_y}}}{S_{x,y}} = \frac{S_x * S_y}{S_{x,y}}$$

Este coeficiente se encuentra siempre entre -1 y 1 ([Navidi, 2010](#)). Si $r < 0$ la correlación es negativa, la recta de mínimos cuadrados tiene una pendiente negativa y las dos variables se correlacionan en sentido inverso. En caso de que $r = -1$ se denomina que es una correlación negativa perfecta, lo que supone una determinación absoluta en sentido inverso entre dos variables y la relación lineal presenta una pendiente negativa. Si $r > 0$ la correlación es positiva y las dos variables se correlacionan en sentido directo cuando existe una tendencia de aumento en la dirección de cambio. Cuanto más próximo a uno esté el coeficiente de correlación, más potente será la correlación. En caso de que $r = 1$ se denomina que es una correlación positiva perfecta y por tanto existe una relación lineal perfecta con pendiente positiva. Si $r = 0$ las variables están incorrelacionadas y no se puede establecer ningún sentido ni patrón de asociación ([Navidi, 2010](#); [Borradaile, 2003](#)).

4.2.3.3 Matriz de correlación

La matriz de correlación muestra los valores de correlación de Pearson, los cuales miden el grado de relación lineal entre cada par de elementos o variables. Se utiliza para evaluar la fuerza y dirección de la relación entre dos elementos y es una de las partes más importantes del algoritmo jerárquico ([Zhou et al., 2018](#)).



La matriz de correlación es cuadrada y simétrica, conformada por n filas y n columnas. Su diagonal está compuesta por unos y fuera de la diagonal tendrá los coeficientes de correlación (r_{ij}) entre las variables, así como se ve en la matriz al final del párrafo. En caso de que el valor sea 0 indica que las variables no tienen correlación, al menos no lineal, puede que tenga una relación cuadrática o de otro grado (Rigol, 2000; Borradaile, 2003; Quino, 2017). Cuando la correlación es positiva indica que su proyección de la regresión lineal va a tender a crecer conjuntamente con la contra variable, y quiere decir que los elementos miden la misma característica. Cuando la correlación es negativa, esto nos indica que su proyección de la regresión lineal va a tender a decrecer conjuntamente con la contra variable.

La matriz de correlación de Pearson se aplica a las muestras de sedimentos activos, para analizar la relación entre variables lo que proporciona información sobre exploración mineral. En la **tabla 1** se muestra la clasificación según el grado de correlación que será usada para determinar el grado de correlación (Khorasanipour, *et al.*, 2011; Davis, 2002).

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & & r_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Tabla 1.

Tabla de clasificación de correlación que incluye los diferentes rangos entre 1 y -1, desde los valores que no tienen correlación, hasta los que presentan una correlación perfecta.

Correlación	Clasificación
$r = \pm 1$	Perfecta
$-1 < R \leq -0.8$ ó $0.8 \leq r < 1$	Excelente
$-0.79 < R \leq -0.7$ ó $0.7 \leq r < 0.79$	Buena
$-0.7 < R \leq -0.5$ ó $0.5 \leq r < 0.7$	Regular
$-0.5 < R \leq -0.25$ ó $0.25 \leq r < 0.5$	Mala
$-0.25 < R \leq 0.25$	No hay correlación



4.2.3.4 Análisis de clúster/conglomerados jerárquico

El análisis de conglomerados jerárquicos se aplica a las muestras geológicas para determinar su grado de homogeneidad, clasifica e identifica el nivel de similitudes y diferencia en grupos homogéneos multivariados de tal modo que los miembros de los grupos individuales se distingan de otros grupos (Davis, 2002; Gluhak & Rosenberg, 2013; Zhou *et al.*, 2018). El agrupamiento jerárquico conecta las observaciones más similares de los datos y luego conecta sucesivamente las siguientes observaciones más similares a estas. Primero se calcula una matriz $n \times n$ de similitudes entre todos los pares de observaciones. Luego se fusionan los pares que tienen las mayores similitudes y se vuelve a calcular la matriz. Esto se hace promediando las similitudes que tienen las observaciones combinadas con otras observaciones. El proceso se repite hasta que la matriz de similitud se reduce a 2×2 . La progresión de los niveles de similitud en la que se fusionan las observaciones se muestra como un dendrograma en el que el eje vertical expresa el nivel de similitud y las diferentes observaciones o muestras se especifican en el eje horizontal (Borradaile, 2003; Zhou *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2017).

En este trabajo, se utilizará el análisis de conglomerados de vinculación de Ward para unir las observaciones más similares. Este método desarrollado por Ward (1963) se basa en un razonamiento de suma de errores cuadrados que solo funciona para la distancia euclidiana entre observaciones (Khorasanipour *et al.*, 2011; Navidi, 2006; Feltrin & Bertelli, 2019).

4.2.3.5 Análisis de Componentes principales

Es una de las técnicas más empleadas en el análisis multivariante que reduce la dimensión de los datos, permite pasar de una gran cantidad de variables interrelacionadas a unos pocos componentes principales.



En este trabajo, se aplica como una herramienta exploratoria orientada a buscar relaciones entre los elementos geoquímicos y a separar las asociaciones de elementos inherentes a la estructura de la matriz de correlación en una serie de grupos de elementos que en conjunto explican la mayor parte de la variabilidad observada de los datos originales (Howarth, 1983; Rigol, 2000; Zuo, 2011, Khorasanipour *et al.*, 2011).

El objetivo es disminuir las dimensiones de un conjunto de datos mediante una transformación lineal que los proyecta sobre las direcciones de máxima varianza. Las nuevas variables resultantes de proyectar los datos de entrada sobre los vectores de proyección se denominan componentes principales y se encuentran ordenados según la varianza de la proyección de los datos, es decir, según la cantidad de información que contengan (Davis, 2002; Sánchez, 2012). El punto de partida del PCA es la matriz de la covarianza entre elementos para las p variables originales. La variabilidad inherente de los datos se descompone de tal modo que pueda ser representada por un conjunto de p nuevas variables, que se extraen de tal manera que no estén correlacionadas entre sí. El primer componente principal explica entonces la mayor parte posible de la variabilidad total de los datos, el segundo la mayor parte posible de la varianza residual, y esto continúa sobre todos los componentes p , hasta que se explica completamente la variabilidad total. Sin embargo, para reproducir completamente la covarianza original, se requieren p variables. Se puede reducir la dimensión de los datos eliminando los componentes principales con menor varianza. Es necesario recalcar que los componentes principales obtienen la máxima varianza y que estos componentes son ortogonales entre si (Ferrero *et al.*, 2002; Hair *et al.*, 2009).

La base matemática del PCA es el algebra lineal y se relaciona con la descomposición de valores singulares. Los datos de entrada se disponen en una matriz $X \in R^{m \times n}$, donde m es el número de variables de entrada y n es el número de observaciones.



Los datos proyectados se dispondrán en una matriz $Y \in R^{p \times n}$, donde p son las variables de salida y n es el número de observaciones, necesariamente el número de variables de salida es menor que el de entrada. Se considera que cada vector $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ contendrá todas las variables de entrada asociadas a una observación i , y a partir de ellas, se calcula el vector $y_i = [y_1, y_2, \dots, y_p]^T$ contendrá las variables de salida. El superíndice T indica la transposición del vector o la matriz ([Sánchez, 2012](#)).

El objetivo del PCA es encontrar una matriz $U \in R^{m \times p}$ que a través de una serie de ecuaciones de transformación lineal transforme el espacio de datos de X en una matriz Y con menos variables conservando la mayor cantidad de información. Esta transformación se proyecta en la máxima varianza de los datos y está definida por los p vectores de proyección u_k . Para maximizar la varianza es necesario mantener la ortogonalidad de la transformación ([Bellehumeur, Marcotte & Jébrak, 1994](#); [Sánchez, 2012](#)).

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m] \quad Y = U^T X \rightarrow Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_p], \quad (m > p)$$

U puede tener hasta $p = m$ vectores de proyección, no obstante, se reducirá esta dimensión conservando únicamente las proyecciones con mayor varianza. La demostración matemática y una explicación extensa del tema se puede encontrar en [Howarth \(1983\)](#), [Davis \(2002\)](#), [Sánchez \(2012\)](#).

4.2.3.6 Análisis Factorial

En análisis de componentes principales o análisis de factores en la geoquímica de exploración se usa para separar las asociaciones de elementos inherentes a la estructura de la matriz de correlación en una serie de grupos de elementos que, en conjunto, representan la mayor parte



de la variabilidad observada de los datos originales. Esta técnica de reducción de datos que sirve para encontrar grupos homogéneos de variables a partir de un conjunto de muchas variables (Tripathi, 1979; Howarth, 1983).

El objetivo es representar el gran número de elementos en los datos originales por un número menor de "factores", cada uno de los cuales es una función lineal (transformación) de las concentraciones de elementos, dando así una mayor eficiencia, comprensión e interpretación de los datos originales (Sun *et al.*, 2009). El análisis factorial se puede utilizar para estudiar series numéricas o valores cuantitativos para un determinado número de variables cuantitativas mayor de dos. Por un lado, esta técnica permite reducir el tamaño de un problema sin demasiada pérdida de información, por otro lado, permite identificar o descubrir fenómenos que no son directamente observables y que son resultantes de la interacción entre las variables. El análisis factorial agrupa variables de tal forma que las variables de cada grupo estén altamente correlacionadas, por ende, explica cómo se relacionan las variables entre sí (Tripathi, 1979; Hair *et al.* 2009; Linares, 2013).

El modelo matemático plantea expresar las variables ($X_1, \dots, X_n$) como combinaciones lineales de nuevas variables ($F_1, \dots, F_p$) de la siguiente forma:

$$X_1 = \alpha_{11F_1} + \alpha_{12F_2} + \dots + \alpha_{1pF_p} + U_1$$

$$X_2 = \alpha_{21F_1} + \alpha_{22F_2} + \dots + \alpha_{2pF_p} + U_2$$

$$X_n = \alpha_{n1F_1} + \alpha_{n2F_2} + \dots + \alpha_{npF_p} + U_n$$

El conjunto de n (variables originales) se expresa en función de p , donde es ideal que $p < n$. A las variables $F_1 \dots F_n$ se les denomina factores comunes porque influyen en las m variables; y a las variables U_n se les denomina factores únicos porque cada U_n influye únicamente en la variable X_n (Hair *et al.* 2009).



4.3 Métodos de interpolación de datos

La interpolación es una estimación de una variable en una ubicación no medida o desconocida ([Bohling, 2007](#)). Las predicciones espaciales han sido matemáticas basadas en geometría y en una cierta apreciación en la naturaleza ([Webster y Oliver, 2007](#); [Mrvić et al., 2011](#)). La técnica de interpolación aplicada en este trabajo fue kriging. El método de kriging se basa en la auto correlación espacial de las variables, además es un estimador lineal insesgado, que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos, asume que la media, aunque desconocida, es constante, que las variables son estacionarias y no tienen tendencias, asimismo permite la transformación de los datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error ([Bohling, 2007](#); [Moreno, 2010 en Delgado & Martínez, 2015](#); [Mazzella y Mazzella, 2013](#)).



5. Resultados

Los datos geoquímicos usados en este estudio incluyen 27 elementos (Au, As, Hg, Mo, Te, Th, U, W, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Cd, In, Tl, Hf, Zr, Ba, Cs, Li, Mn, Rb, K, S) y los REE que fueron determinados de 930 muestras de sedimentos activos. Los datos fueron adquiridos en el SIGÉOM (Sistema de información geo minero de Quebec) y las muestras de sedimentos activos fueron tomadas en diversas campañas desde 1957 por diversos métodos de la química analítica.

Después de descargar los datos geoquímicos crudos de la zona de estudio, se deben eliminar los datos censurados (valores menores al límite de detección reportado por el laboratorio). Esto se hace sustituyendo estos datos por 0,5 veces el límite de detección. Cuando más del 30% de los datos sea menor al límite de detección, este elemento se elimina ya que podría generar ruido ([Grunsky & Smee, 1999](#); [Carranza, 2011](#)).

Con el fin de realizar un correcto tratamiento de los datos es necesario realizar el amalgamamiento de los elementos tierras raras, donde se deben sumar todos estos elementos como un total, esto se hace porque en general tienen la misma información geoquímica ([Valls, 2016, 2017](#)). Posteriormente se debe realizar la normalización del hierro y del manganeso para una mejor interpretación de los datos. Cuando el hierro y el manganeso precipitan generan un redox muy grande, tanto que, si encuentran un catión cerca precipitan y provocan anomalías que no se encuentran relacionadas con el depósito sino con una reacción de redox. Para eliminar el efecto de estos dos elementos se debe dividir el cobalto, zinc, níquel, bario y tierras raras por el manganeso, mientras que el uranio, torio, plomo, zircón y tierras raras se dividen por el hierro ([Valls, 2016, 2017](#)).

Luego de realizar este procesamiento de datos en Microsoft Excel, se deben cargar los datos en CoDaPack y se analiza la estadística composicional, gráficos biplot, dendrogramas, el



análisis composicional de los datos y la transformación de los datos. Una ventaja de este software es que a la hora de realizar cualquier función estadística internamente transforma los datos a un sistema abierto ([Aitchison, 1984, 1999; Valls, 2016](#)).

Como todos los datos no extraen información relevante para el análisis estadístico, lo primero que se realizó fue un filtrado por medio del coeficiente de variación que representa la dispersión de los datos. Esto se llevó a cabo calculando la desviación estándar, dividiéndola por el promedio y multiplicándolo por cien ([Wu et al., 2020](#)).

$$\text{Coeficiente de variación} = \text{Desvest (X)} / \text{Promedio (X)} * 100$$

$$CV = \sigma / \bar{x} * 100$$

A partir de esta operación, se escogieron los elementos que tuviesen un coeficiente de variación mayor a 246 como se muestra en la **tabla 2**. Se escogieron en total 27 elementos de 930 muestras de sedimentos activos. Los valores más grandes de los coeficientes de variación indican las distribuciones extremadamente inhomogéneas de estos elementos y podría significar que los valores altos podrían contener más información de la mineralización, como es el caso del Mo, Te, Th, U, W, Pb, In, Zr, REE ([Zhao et al., 2015; Valls, 2017](#)).

Tabla 2.

Tabla de los elementos 26 elementos de la zona de estudio y su coeficiente de variación. Los valores en rojo son los coeficientes de variación más altos, es decir, los que pueden contener más información.

Elementos	Au	As	Hg	Mo	Te	Th	U	W	Co	Cu	Ni	Pb	Zn
Coeficiente de variación	246,54	317,81	412,95	585,55	581,44	789,14	626,02	501,07	343,03	259,22	389,79	495,55	429,70
Elementos	Cd	In	Tl	Hf	Zr	Ba	Cs	Li	Mn	Rb	K	S	REE
Coeficiente de variación	420,71	605,11	256,81	292,62	822,56	377,74	259,18	251,02	341,88	279,34	262,50	278,43	779,52

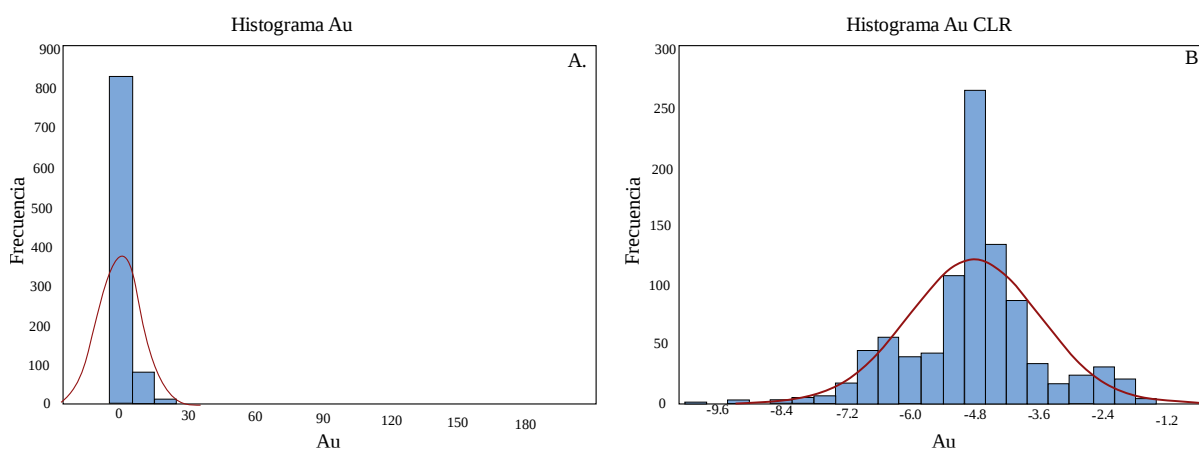
5.1 Estadística univariante



El histograma se realizó con todos los datos, tanto previo a la transformación como posterior, para efectos prácticos, solo se muestra gráficamente el elemento oro ya que es el más representativo de la mineralización. A partir del histograma se comprueba que los elementos transformados tienen una distribución normal (**Ver Figura 6A y 6B**).

Figura 6.

6a. Histograma con los datos crudos y 6b Histograma con los datos transformados CLR



5.2 Diagrama de Cajas y Bigotes

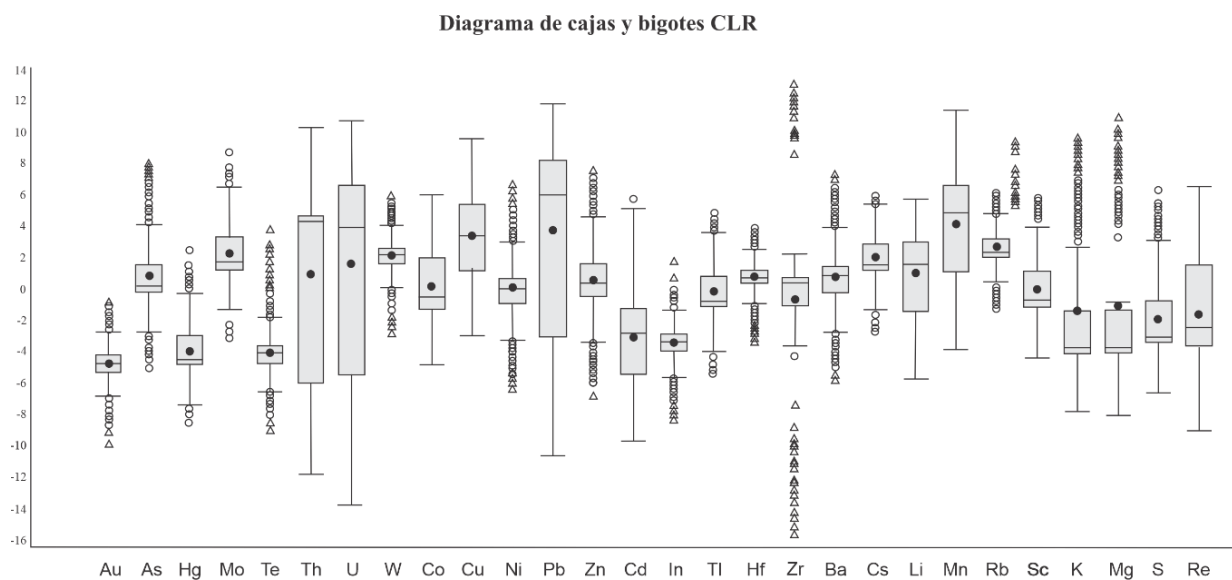
Posterior a la transformación CLR de los datos, se realizaron los diagramas de cajas y bigotes que muestran la dispersión de los datos (**Ver Figura 7**). Los elementos con menor dispersión en la zona son el Hf, W, Au, Te, In, Rb, Ni, As, Hg, Mo, Tl, Zr, Zn, Ba, Cs, Sc. Los elementos con una dispersión media son el Co, Cu, Cd, Li, Mn, K, Mg, S y Re y por último los elementos con mayor dispersión son el Th, U, Pb. Los elementos que presentan una distribución normal simétrica de los datos son, el Au, Hf, In, Cu y W.

Los elementos que presentan una distribución asimétrica positiva son el As, Hg, Mo, Co, Zn, Tl, Cs, Sc, Rb, K, Mg, S y Re, y por último los elementos que presentan una distribución asimétrica negativa son Te, Th, U, Ni, Pb, Tl, Cd, Zr, Ba, Li y Mn.

Los elementos que presentan atípicos positivos son el Cd, Sc, K, Mg y S que pueden estar indicando zonas con concentraciones anómalamente altas. Los elementos que presentan valores atípicos positivos y negativos son el Au, As, Hg, Mo, Te, W, Ni, Zn, In, Tl, Hf, Zr, Ba, Cs y Rb lo que puede indicar zonas tanto empobrecidas como enriquecidas en dichos elementos, a su vez, esto implica una posible removilización debido a los distintos procesos geológicos que ha sufrido la zona.

Figura 7.

Diagramas de cajas y bigotes que muestra la distribución de los elementos transformados previamente con CLR, los datos atípicos, la media, mediana y moda.





5.3 Matriz de correlación

La matriz de correlación de Pearson se realizó con un nivel de confianza del 95% y con los datos previamente abiertos con la transformación logratio centrada (CLR) para determinar las asociaciones geoquímicas entre los diferentes elementos. La **tabla 3** representa la matriz de análisis de correlación aplicada a los elementos. De manera general, un nivel de correlación excelente y positivo indica que los elementos miden la misma destreza o característica, es decir que, podrían evidenciar la mineralización, zonas de lixiviación o un proceso geológico. Esta matriz evidencia que el Au tiene un nivel de correlación positivo y excelente con W, buen nivel con Te, In y regular con Hf-Mn. El As presenta un nivel de correlación regular con W-Hf-Zr-Rb. El Hg presenta un nivel de correlación bueno con U-Th-Sc, regular con Pb-Tl-Rb-K-Mg-S-REE. Elementos como U-Th-Pb-Sc-Mg-K presentan entre buenas y excelentes niveles de correlación. El Co-Zn-Ni-Cs-Cd-Mn presentan niveles de correlación positivos, entre buenos y regulares.

Tabla 3

Matriz de correlación de los elementos abiertos con la transformación CLR. Los valores con un nivel excelente de correlación se encuentran en color rojo, los que presentan un buen nivel de correlación se encuentran en naranja y los que presentan un nivel regular se encuentran en amarillo

	Au	As	Hg	Mo	Te	Th	U	W	Co	Cu	Ni	Pb	Zn	Cd	In	Tl	Hf	Zr	Ba	Cs	Li	Mn	Rb	Sc	K	Mg	S	REE
Au	1																											
As	0,47	1																										
Hg	0,05	0,42	1																									
Mo	0,14	0,50	0,65	1																								
Te	0,70	0,33	-0,02	0,10	1																							
Th	0,14	-0,46	-0,72	-0,71	0,16	1																						
U	0,17	-0,46	-0,71	-0,65	0,17	0,93	1																					
W	0,87	0,52	0,09	0,25	0,67	0,06	0,10	1																				
Co	0,06	-0,01	-0,22	-0,15	0,08	-0,03	0,00	0,04	1																			
Cu	-0,22	0,20	0,47	0,53	-0,25	-0,64	-0,57	-0,15	-0,26	1																		
Ni	-0,13	-0,04	-0,12	-0,06	-0,14	-0,24	-0,18	-0,14	0,71	0,04	1																	
Pb	0,08	-0,50	-0,69	-0,70	0,11	0,95	0,92	0,00	-0,07	-0,55	-0,21	1																
Zn	-0,14	0,03	-0,01	0,02	-0,13	-0,31	-0,27	-0,12	0,63	0,12	0,68	-0,27	1															
Cd	-0,24	-0,03	0,11	0,08	-0,22	-0,33	-0,32	-0,25	0,71	-0,02	0,61	-0,36	0,55	1														
In	0,76	0,45	0,07	0,17	0,62	0,07	0,09	0,78	0,01	-0,16	-0,17	0,02	-0,16	-0,30	1													
Tl	-0,06	0,44	0,69	0,63	-0,08	-0,77	-0,78	0,06	-0,26	0,50	-0,09	-0,77	-0,03	-0,06	0,04	1												
Hf	0,63	0,59	0,33	0,39	0,49	-0,22	-0,23	0,73	-0,10	0,02	-0,20	-0,30	-0,15	-0,27	0,68	0,36	1											
Zr	-0,41	-0,63	-0,45	-0,53	-0,33	0,61	0,52	-0,50	-0,22	-0,33	-0,28	0,61	-0,27	-0,15	-0,44	-0,53	-0,58	1										
Ba	-0,30	-0,20	-0,10	-0,12	-0,28	-0,15	-0,13	-0,34	0,59	-0,05	0,52	-0,12	0,51	0,62	-0,33	-0,19	-0,39	0,01	1									
Cs	-0,03	0,43	0,60	0,59	-0,05	-0,72	-0,69	0,11	-0,24	0,42	-0,10	-0,72	-0,04	-0,04	0,12	0,72	0,48	-0,55	-0,21	1								
Li	-0,27	0,03	0,17	0,16	-0,27	-0,32	-0,29	-0,18	-0,42	0,35	-0,19	-0,27	-0,14	-0,35	-0,14	0,34	0,09	-0,12	-0,12	0,44	1							
Mn	0,53	0,39	0,29	0,32	0,38	-0,04	-0,02	0,56	-0,71	0,21	-0,62	-0,02	-0,53	-0,79	0,54	0,33	0,61	-0,23	-0,69	0,33	0,30	1						
Rb	0,18	0,52	0,53	0,58	0,17	-0,60	-0,58	0,34	-0,22	0,32	-0,18	-0,62	-0,10	-0,17	0,34	0,69	0,68	-0,61	-0,28	0,82	0,39	0,47	1					
Sc	-0,09	0,40	0,71	0,63	-0,13	-0,82	-0,84	-0,05	-0,27	0,54	-0,07	-0,82	-0,03	0,04	-0,04	0,83	0,29	-0,48	-0,15	0,71	0,33	0,27	0,60	1				
K	-0,45	0,20	0,54	0,45	-0,41	-0,78	-0,82	-0,41	-0,26	0,54	0,01	-0,78	0,04	0,14	-0,36	0,71	-0,03	-0,25	0,00	0,60	0,39	0,00	0,42	0,82	1			
Mg	-0,44	0,19	0,56	0,43	-0,41	-0,78	-0,81	-0,41	-0,26	0,52	-0,02	-0,77	0,03	0,15	-0,35	0,71	-0,04	-0,24	0,01	0,57	0,38	0,00	0,39	0,81	0,96	1		
S	-0,27	0,19	0,64	0,54	-0,22	-0,70	-0,68	-0,20	-0,18	0,52	-0,03	-0,65	0,02	0,23	-0,22	0,61	-0,01	-0,23	0,01	0,52	0,19	0,04	0,35	0,59	0,59	0,60	1	
REE	-0,17	-0,46	-0,59	-0,55	-0,06	0,57	0,52	-0,26	0,49	-0,58	0,24	0,50	0,11	0,40	-0,23	-0,63	-0,46	0,43	0,32	-0,58	-0,50	-0,68	-0,57	-0,61	-0,48	-0,48	-0,41	1

Nivel de correlación	
0,8 < r < 0,99	Excelente
0,7 < r < 0,79	Buena
0,5 < r < 0,69	Regular



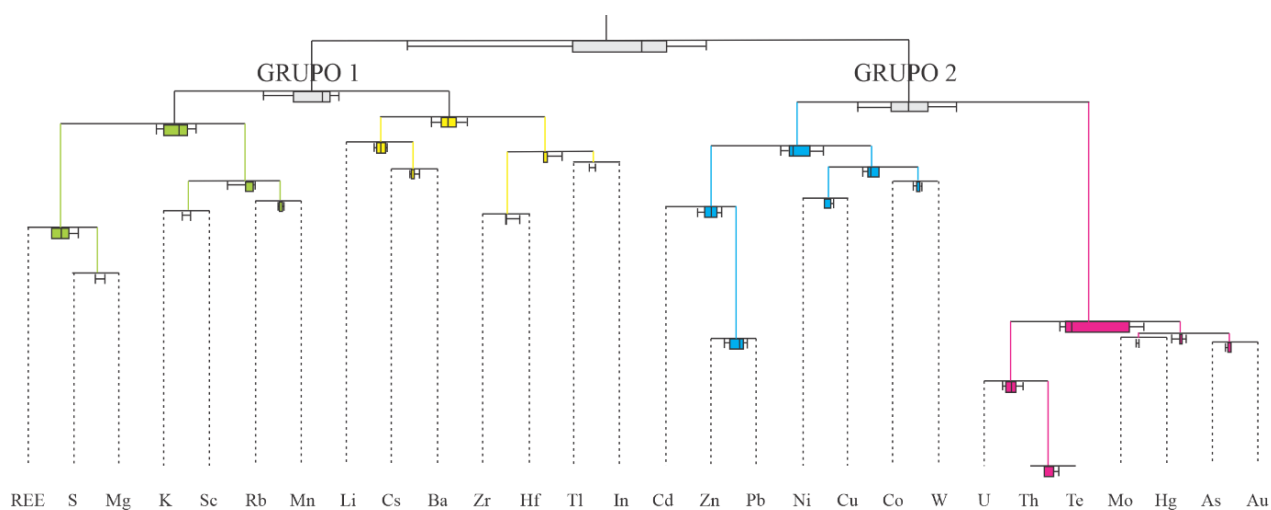
El Tl presenta correlaciones positivas, excelente correlación con el Sc, y positivas y buenas con Cs-K-Mg, y regulares con Zr-Rb-S-REE.

5.4 Análisis conglomerado jerárquico

5.4.1 Dendrograma IRL

Figura 8.

Dendrograma de los elementos usando la transformación ILR. El dendrograma evidencia dos grandes grupos y cuatro subgrupos. Los elementos se encuentran en un color respectivo de acuerdo con su nivel de correlación, pudiendo ser verde, amarillo, azul o magenta.



El dendrograma se realizó mediante una partición binaria secuencial de las partes seleccionadas (Egozcue & Pawlowsky-Glahn, 2005, Thio-Henestrosa & Comas, 2016). Este diagrama representa dos conglomerados principales y cuatro subdivisiones (**ver Figura 8**). El Grupo 1 está subdividido en el grupo magenta y cian, el grupo magenta presenta las similitudes más fuertes y la menor dispersión, representa la mineralización y está conformado por Au, As, Hg, Mo, Te, Th, U, elementos que corresponden a la suite de oxidados.



El grupo cian corresponde a Cd, Zn, Pb, Ni, Cu, Co, W, donde Zn-Pb tienen un alto nivel de similitud, este grupo puede formar enlace con el azufre en forma de sulfuros y relacionarse con un depósito polimetálico.

El grupo 2, se encuentra subdividido en el grupo amarillo y verde, el grupo amarillo presenta elementos tanto litófilos como calcófilos tales como Li, Cs, Ba, Zr, Hf, Tl, In. El grupo verde corresponde a los elementos mayores y litófilos, que se caracterizan por presentar una fuerte afinidad por el oxígeno y con las rocas de silicato, en este grupo se encuentra S, Mg, Sc, Rb, Mn y REE y pueden representar la litología.

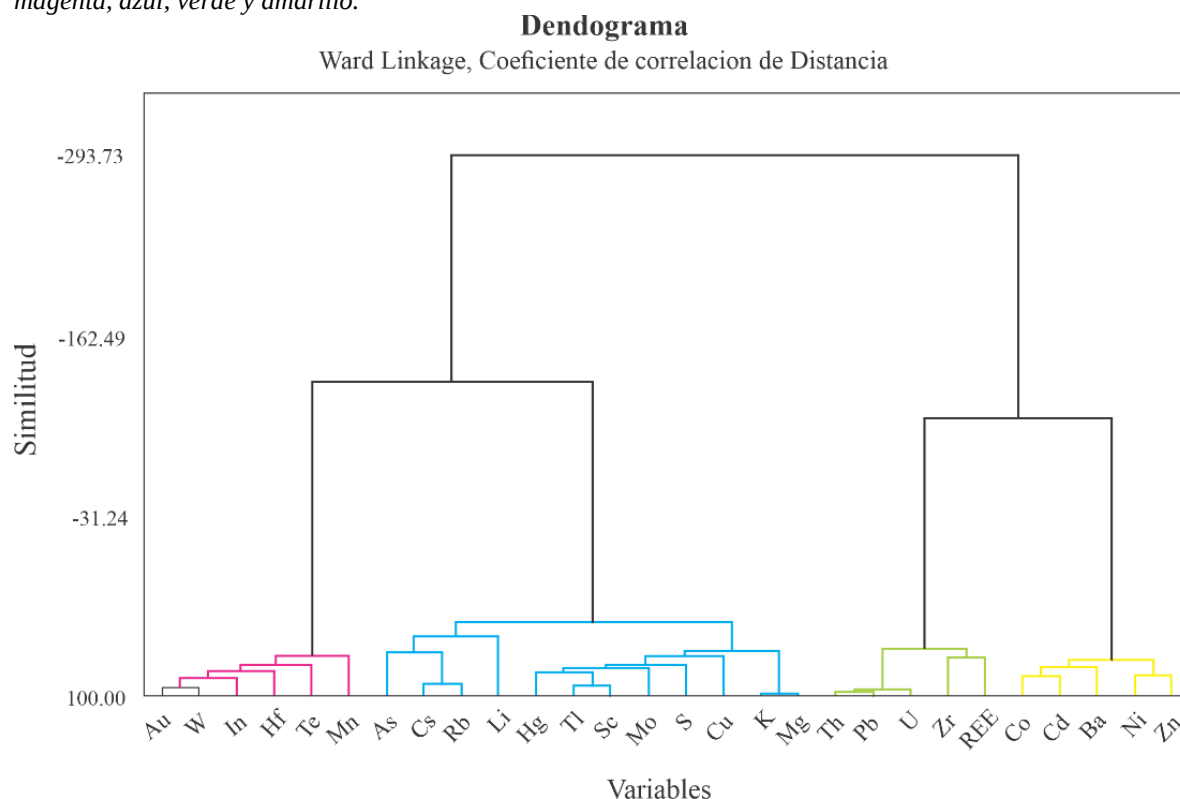
5.4.2 *Dendrograma CRL*

El análisis de agrupación jerárquica por el método de Ward establece dos conglomerados principales (clúster) y cuatro subgrupos significativos (magenta, cian, verde y amarillo) como se muestra en la **Figura 9**. Previo a la realización de este dendrograma se abrieron los datos por medio de la transformación logratio centrada (CLR) ([Aitchison, 1984, 1999](#)).

El primer conglomerado (extremo izquierdo, color magenta) se compone de Au, W, In, Hf, Te, Mn. El segundo conglomerado, inmediatamente a la derecha, representado en color cian y se compone de elementos como As, Cs, Rb, Li, Hg, Tl, Sc, Mo, S, Cu, K, Mg. El tercer grupo, representado en color verde contiene elementos como Th, Pb, U, Zr, REE. El cuarto grupo, en el extremo derecho (color amarillo), se compone de Co, Cd, Ba, Ni, Zn.

**Figura 9.**

Dendrograma de los elementos transformados con CLR usando la unión de Ward y el coeficiente de correlación de distancia. Según el nivel de similitud entre los elementos se observan 4 subgrupos representados en los colores magenta, azul, verde y amarillo.



5.5 Biplot

La representación Biplot es una representación gráfica de datos multivariantes en dos o tres dimensiones donde las variables son normalmente vectores y los individuos se representan por puntos. Se trata de una generalización multivariante de un diagrama de dispersión de dos variables, se desarrolla en el espacio euclídeo y se caracteriza por representaciones punto – vector. Las filas se representan normalmente como puntos mientras las variables son representadas mediante vectores, ejes lineales, trayectorias no lineales o regiones de predicción.

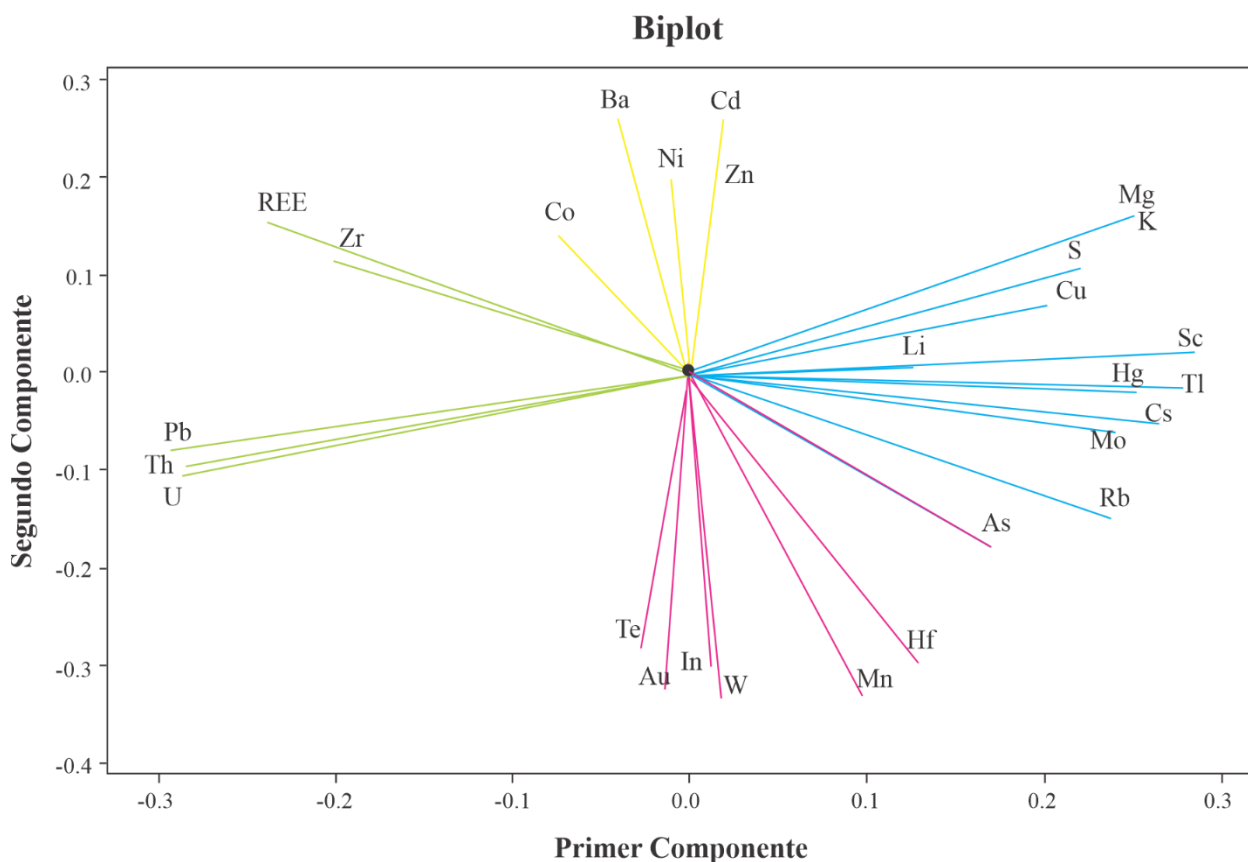


El ángulo entre un vector y cada uno de los ejes principales mide la importancia de la contribución que cada dimensión realiza sobre los datos de los que se deriva el vector. Los datos composicionales geoquímicos se abrieron con el software CoDaPack v2.01 y se transformaron utilizando las transformaciones log ratio isométrica (Ilr), log ratio centrada (Clr), antes de utilizar cualquiera de los métodos multivariantes. Cuando los elementos aparecen próximos a un mismo plano, significa que los valores en ambas variables son muy similares, presentan mayor tendencia en común y por tanto mayor asociación. Teniendo esto en cuenta, en la **Figura 10**, se observan cuatro agrupaciones. El grupo magenta se constituye por Hf-W-Mn-In-Au-Te elementos relacionados con la mineralización. El grupo de verde se constituye por U-Th-Pb que se podría relacionar con rocas félsicas. En el grupo de color cian se encuentra Mg-K-S-Cu-Sc-Mo-Hg-Tl-Cs-As-Rb-Li-Hf se podrían relacionar con la roca caja. Y por último el grupo color amarillo se constituye por Co-Ni-Ba-Zn-Cd-Zr-REE que se podría relacionar con un polimetálico.

Los vectores que más se alejan del origen o son más largos de la gráfica indican los elementos que tienen mayor efecto en cada componente, por tanto, contienen más información y se denominan elementos informativos, en este caso, serían U-Th-Pb-Mn-Mg-K. Los radios que están en ángulos cercanos a 90 grados tienen una alta asociación y contienen información importante. En la **Figura 10**, se observa que Au-W-Te-Mn-In-Hf-Li-As está a 90 grados tanto con U-Th-Pb-Zr como con Mg-K-S-Cu-Li-Sc-Tl-Cs-Mo-Rb. Así mismo, el grupo Cd-Zn-Ni-Ba-Co está a 90 grados tanto con Mg-K-S-Cu-Sc-Mo-Hg-As-Rb-Tl-Cs como con U-Th-Pb.

**Figura 10.**

Diagrama Biplot de los elementos usados en el proyecto, donde se evidencia la agrupación elemental y sus asociaciones en 4 subgrupos en los colores amarillo, verde, magenta y azul.



5.6 Análisis de componentes principales (ACP)

Con el fin de extraer los componentes principales y los elementos relacionados con la mineralización se aplicó el análisis de componentes principales a los datos previamente abiertos con la transformación logratio centrada (CLR) (Lin *et al.*, 2014). Se utilizó el criterio de Kaiser (eigenvalor > 1) para escoger los componentes principales (Kaiser, 1958; Cloutier, 2008).

La gráfica de sedimentación (*screeplot*) muestra que los valores propios comienzan a formar una línea recta después del cuarto componente principal y que solo los primeros 4 componentes principales tienen eigenvalores mayores que 1, por lo tanto, los componentes



principales restantes carecen de importancia ya que presentan una variabilidad cercana a cero (**Ver Figura 11**). El porcentaje se refiere a la proporción de variabilidad en los datos que explica cada componente principal, en este trabajo, se escogieron los componentes principales que explican la mayor variabilidad de los datos. A pesar de que el cuarto componente principal tiene un eigenvalor mayor a uno, su porcentaje de variabilidad representa tan solo el 4,13%, razón por la que se descarta el uso de este componente. Los 3 componentes que se toman en cuenta en este trabajo explican el 73,93% de la variación de los datos (**Ver tabla 4**). El primer componente principal explica 37,50% de la variabilidad de los datos, su eigenvalor corresponde a 10,50, tiene asociaciones positivas de Th-Pb-U y negativas de Rb-Mo-Mg-K-Hg-Cs-Tl-Sc. El segundo componente principal explica el 22,26% de la variabilidad de los datos, su eigenvalor corresponde a 6,23, tiene asociaciones grandes positivas de Mn-W-Au-In-Hf-Te. El tercer componente principal explica el 14,17% de la variabilidad de los datos, su eigenvalor corresponde a 3,97 y tiene asociaciones positivas de Co-Ni-Zn-Cd (**Ver tabla 4**).

Figura 11.

Screeplot de los componentes principales vs eigenvalores. Donde se evidencia que solo se deben usar los tres primeros componentes principales.

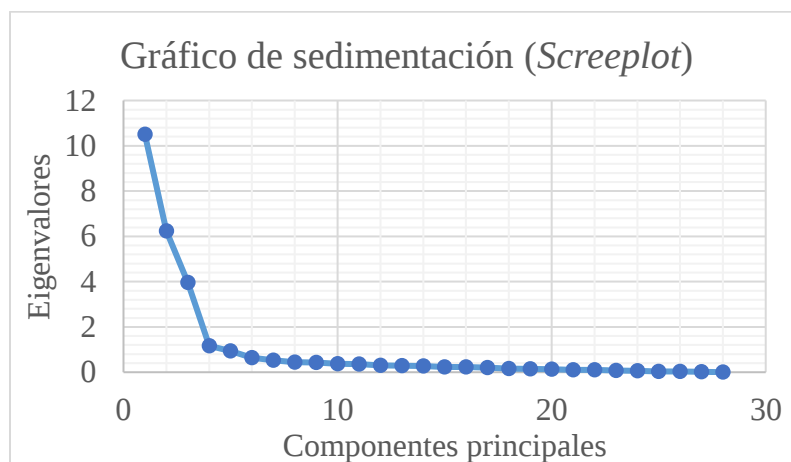



Tabla 4.

Componentes principales con sus respectivos eigenvalores. Los valores subrayados son mayores a 0,7 y hacen parte de los componentes que se deben tener en cuenta.

	PC1	PC2	PC3
As	-0,56	0,40	0,38
Mn	-0,37	<u>0,82</u>	-0,35
W	-0,10	<u>0,82</u>	0,45
Au	0,01	<u>0,80</u>	0,44
In	-0,09	<u>0,79</u>	0,37
Hf	-0,44	<u>0,70</u>	0,29
Te	0,06	<u>0,69</u>	0,39
Rb	<u>-0,77</u>	0,32	0,07
U	<u>0,89</u>	0,31	-0,16
Th	<u>0,91</u>	0,30	-0,21
Pb	<u>0,89</u>	0,26	-0,26
Mo	<u>-0,77</u>	0,10	0,15
Cs	<u>-0,84</u>	0,07	-0,02
Hg	<u>-0,79</u>	0,00	0,03
Tl	<u>-0,89</u>	-0,01	-0,06
Li	-0,42	-0,02	-0,46
Sc	<u>-0,90</u>	-0,11	-0,09
Cu	-0,64	-0,20	-0,16
Zr	0,63	-0,23	-0,58
S	-0,68	-0,31	-0,11
Re	0,75	-0,31	0,21
Co	0,27	-0,36	<u>0,82</u>
Mg	<u>-0,77</u>	-0,44	-0,26
K	<u>-0,78</u>	-0,44	-0,25
Zn	-0,02	-0,48	<u>0,61</u>
Ni	0,07	-0,51	<u>0,64</u>
Ba	0,17	-0,64	0,42
Cd	-0,01	-0,66	<u>0,60</u>
	Eigenvalores	Porcentaje	Cumulative %
PC1	10,50	37,50	37,50
PC2	6,23	22,26	59,76
PC3	3,97	14,17	73,93
Componentes principales			
PC1	(Th + Pb + U) / (Rb + Mo+ Mg + K + Hg + Cs + Tl + Sc)		
PC2	(Mn + W + Au + In + Hf + Te)		
PC3	Co + Ni + Zn + Cd		



5.7 Análisis factorial

Algunos elementos pueden servir de guía para descubrir depósitos minerales o evidenciar procesos geológicos, además se pueden asociar con tipos de mineralización específicos (Wu *et al.*, 2020). El análisis factorial se utilizó para explorar las asociaciones de elementos del depósito. Se transformaron los datos con ALR y CLR y se utilizó la rotación varimax para maximizar la varianza de los factores, donde sólo las cargas factoriales superiores a 0,7 se consideran fiables para la tarea de interpretación (Lin *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2020, Zhao *et al.*, 2015). Todas las variables del análisis factorial se utilizaron para construir un gráfico de sedimentación (*screeplot*) tanto para los datos abiertos con la transformación ALR como CLR (Figura 12 y 13). El número de factores seleccionados se basa en el criterio de Kaiser (Kaiser, 1960), para el que sólo se retienen los factores con valores propios superiores a 1 (Cloutier *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2014).

Los resultados mostraron que para cada uno de los datos transformados solo tres factores tienen vectores propios superiores al criterio de Kaiser (1960). Los demás factores (vectores propios diferentes de 1) no se consideraron en las inferencias estadísticas, ya que explican porcentajes muy bajos de varianza (Khorasanipour *et al.*, 2011).

5.7.1. ALR, varimax rotado

Los factores obtenidos luego de abrir los datos con la transformación logratio aditiva explican el 68,06% de la varianza total del conjunto de datos. El primer factor tiene un eigenvalor de 11,76 y 42,01% de varianza. Está conformado por Tl, Sc, K, Cs, Mg, Rb, Hg, S, Mo, Hf, Cu, Li (Ver tabla 5).



El segundo factor tiene un eigenvalor de 4,85, varianza de 17,33% y tiene cargas significativas de Co, Cd, Ni, Ba, Zn. Elementos que podrían indicar rocas ultramáficas y presencia de minerales como piritita o calcopiritita. Además, este factor tiene cargas significativas negativas de Mn, esto implica un comportamiento geoquímico diferente de este elemento. El eigenvalor del tercer factor es de 2,44 y su varianza 8,71%, tiene cargas significativas de Pb, Th, U y Zr. Estos elementos son litófilos y suelen encontrarse en rocas félsicas (**Ver tabla 5**).

Figura 12.

Screeplot eigenvalores vs factores, elementos transformados con ALR y varimax rotado. Donde se muestra los factores con más información y que deben ser tomados en cuenta, en este caso son los tres primeros.

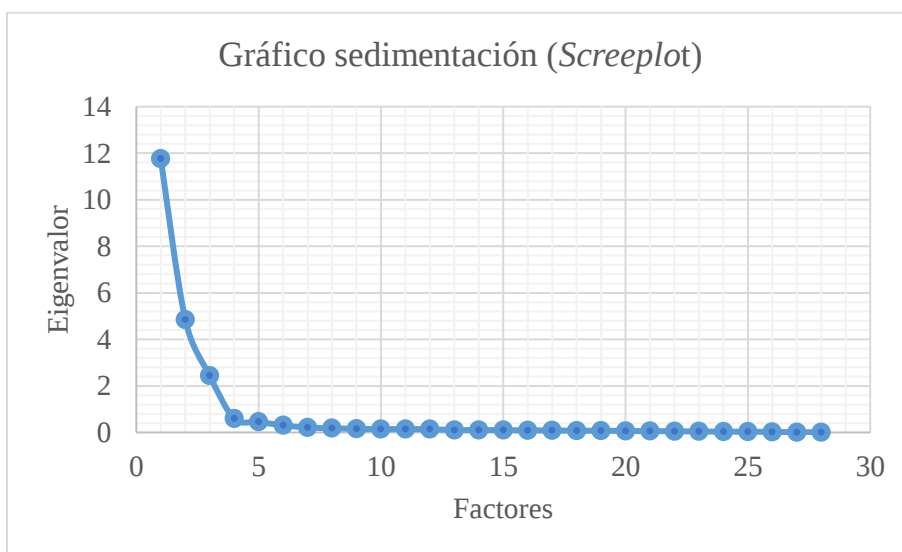



Tabla 5.

Elementos transformados con ALR, usando análisis factorial varimax rotado. Los valores mayores a $\pm 0,7$ se encuentran subrayados ya que son los que deben ser tomados en cuenta en los factores.

Eigenvalores				Cargas factoriales varimax				
Factor	Eigenvalor	Varianza (%)	Porcentaje acumulado		Factor 1	Factor 2	Factor 3	Comunalidades
1	11,764	42,016	42,016	Pb	-0,396	-0,021	0,883	0,937
2	4,853	17,331	59,347	Th	-0,452	-0,020	0,877	0,973
3	2,441	8,719	68,066	U	-0,508	-0,028	0,802	0,902
4	0,601	2,147	70,212	Zr	0,209	0,186	0,798	0,716
5	0,456	1,628	71,840	REE	-0,066	0,661	0,571	0,768
6	0,305	1,090	72,930	Li	0,713	-0,025	0,140	0,529
7	0,215	0,769	73,698	Ba	0,286	0,772	0,133	0,696
8	0,179	0,639	74,337	Te	0,033	0,065	0,029	0,006
9	0,158	0,563	74,900	Co	0,033	0,950	0,005	0,904
10	0,146	0,523	75,422	In	0,304	-0,011	-0,036	0,094
11	0,143	0,511	75,933	Mn	0,353	-0,906	-0,038	0,947
12	0,141	0,502	76,435	Au	0,176	0,136	-0,051	0,052
13	0,106	0,377	76,812	Ni	0,208	0,814	-0,053	0,709
14	0,103	0,367	77,180	Cd	0,285	0,880	-0,070	0,861
15	0,096	0,342	77,522	Hf	0,789	0,074	-0,102	0,638
16	0,091	0,325	77,847	W	0,490	0,143	-0,107	0,272
17	0,085	0,304	78,151	S	0,796	0,235	-0,110	0,702
18	0,075	0,269	78,420	Zn	0,241	0,751	-0,110	0,634
19	0,073	0,262	78,682	Rb	0,884	0,100	-0,117	0,805
20	0,065	0,233	78,915	Cs	0,900	0,142	-0,124	0,845
21	0,058	0,208	79,123	Cu	0,750	0,135	-0,124	0,596
22	0,051	0,183	79,305	Hg	0,850	0,205	-0,139	0,783
23	0,042	0,149	79,455	Tl	0,911	0,138	-0,169	0,877
24	0,033	0,119	79,574	Sc	0,910	0,151	-0,193	0,888
25	0,031	0,111	79,685	K	0,903	0,160	-0,195	0,879
26	0,023	0,082	79,766	Mg	0,889	0,151	-0,208	0,856
27	0,013	0,045	79,811	Mo	0,791	0,174	-0,255	0,721
28	0,011	0,039	79,850	As	0,493	0,056	-0,470	0,467
Suma de cuadrados					10,196	5,113	3,749	19,058
Porcentaje de varianza					36,415	18,260	13,390	68,066
Factores								
Factor 1	(Tl + Sc + K + Cs + Mg + Rb + Hg + S + Mo + Hf + Cu + Li)							
Factor 2	(Co + Cd + Ni + Ba + Zn) / (Mn)							
Factor 3	(Pb + Th + U + Zr)							



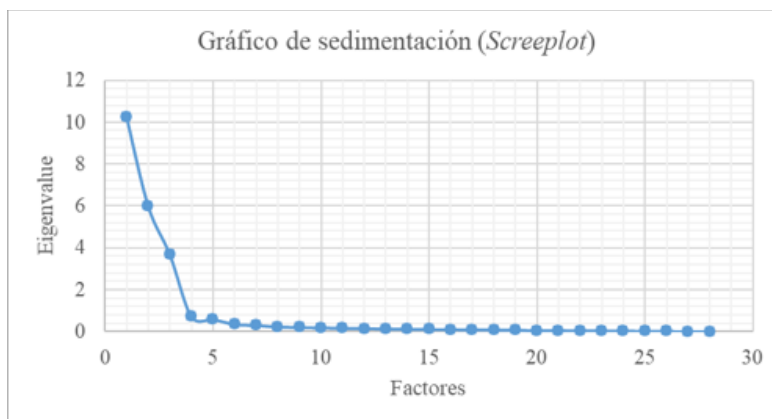
5.7.2 CRL, varimax rotado

Los factores obtenidos luego de abrir los datos con la transformación logratio centrada explican el 71,16% de la varianza total del conjunto de datos. El primer factor explica el 36,12% de la varianza, su eigenvalor corresponde al 10,25, tiene cargas significativas de Th, U, Pb, los dos primeros elementos son litófilos y tienen afinidad por los silicatos, mientras que el Pb, es calcófilo y tiene afinidad con el azufre. Estos elementos se pueden encontrar en rocas félsicas. Este factor contiene cargas negativas significativas de Sc, Tl, K, Mg, Cs, Hg, Mo y S. Este factor se encuentra relacionado con la litología de la roca caja. El segundo factor presenta una varianza de 21,39%, su eigenvalor corresponde al 5,98, tiene cargas significativas de W, Au, In, Hf, Te, y puede indicar la principal mineralización (**Ver tabla 6**).

El tercer factor presenta una varianza de 13,14%, su eigenvalor corresponde a 3,68 y está dominado por Co, Ni, Cd, Zn (**Ver tabla 6**). Los dos primeros elementos son comunes en rocas ultramáficas, mientras que los dos últimos son calcófilos y ocurren en minerales como la pirita o calcopirita. Además, este factor tiene cargas significativas negativas de Mn, indicando un comportamiento geoquímico diferente para este elemento. Al ser un elemento litófilo, se podría relacionar con la roca caja y ocurrir en minerales como anfíboles.

Figura 13.

Gráfico de sedimentación (Screeplot) eigenvalores vs factores con elementos transformados por CLR usando Análisis



**Tabla 6.**

Elementos transformados con CLR, factores varimax rotados. Los valores mayores a $\pm 0,7$ se encuentran subrayados ya que son los que deben ser tomados en cuenta en los factores.

Eigenvalores				Cargas factoriales varimax				
Factor	Eigenvalor	Varianza (%)	Porcentaje acumulado		Factor 1	Factor 2	Factor 3	Comunalidades
1	10,256	36,628	36,628	Th	0,957	-0,023	-0,251	0,980
2	5,989	21,390	58,018	U	0,937	0,017	-0,215	0,924
3	3,681	13,148	71,166	Pb	0,932	-0,085	-0,268	0,947
4	0,711	2,538	73,704	REE	0,670	-0,240	0,413	0,677
5	0,581	2,074	75,778	Zr	0,561	-0,601	-0,258	0,742
6	0,351	1,254	77,032	Co	0,202	0,148	0,895	0,864
7	0,299	1,067	78,100	Te	0,179	0,722	-0,076	0,560
8	0,226	0,806	78,905	Au	0,159	0,887	-0,094	0,820
9	0,196	0,699	79,604	In	0,063	0,834	-0,155	0,723
10	0,179	0,641	80,245	W	0,061	0,928	-0,110	0,876
11	0,165	0,589	80,834	Ba	0,045	-0,283	0,676	0,540
12	0,148	0,527	81,362	Ni	-0,024	-0,048	0,780	0,611
13	0,130	0,465	81,827	Zn	-0,105	-0,032	0,719	0,528
14	0,112	0,399	82,226	Cd	-0,131	-0,175	0,854	0,776
15	0,106	0,380	82,605	Mn	-0,214	0,510	-0,799	0,945
16	0,096	0,343	82,948	Hf	-0,297	0,783	-0,208	0,744
17	0,088	0,316	83,264	Li	-0,397	-0,182	-0,355	0,317
18	0,081	0,290	83,554	As	-0,460	0,588	0,008	0,557
19	0,067	0,238	83,792	Cu	-0,641	-0,131	-0,079	0,435
20	0,051	0,181	83,973	Rb	-0,681	0,406	-0,205	0,671
21	0,049	0,176	84,149	S	-0,698	-0,184	0,014	0,521
22	0,043	0,153	84,302	Mo	-0,716	0,278	-0,020	0,590
23	0,035	0,124	84,426	Hg	-0,757	0,141	-0,062	0,597
24	0,029	0,103	84,529	Cs	-0,794	0,173	-0,147	0,683
25	0,021	0,076	84,605	Mg	-0,838	-0,379	-0,042	0,848
26	0,019	0,067	84,672	K	-0,848	-0,379	-0,042	0,865
27	0,003	0,010	84,682	Tl	-0,863	0,095	-0,139	0,773
28	0,002	0,007	84,690	Sc	-0,894	0,001	-0,108	0,812
Suma de cuadrados					10,111	5,317	4,498	19,926
Porcentaje de varianza					36,112	18,990	16,064	71,166
Factores								
Factor 1	(Th + U + Pb) / (Sc + Tl + K + Mg + Cs + Hg + Mo)							
Factor 2	(W + Au + In + Hf + Te)							
Factor 3	(Co + Cd + Ni + Zn) / (Mn)							



5.8 Mapa Cuartiles

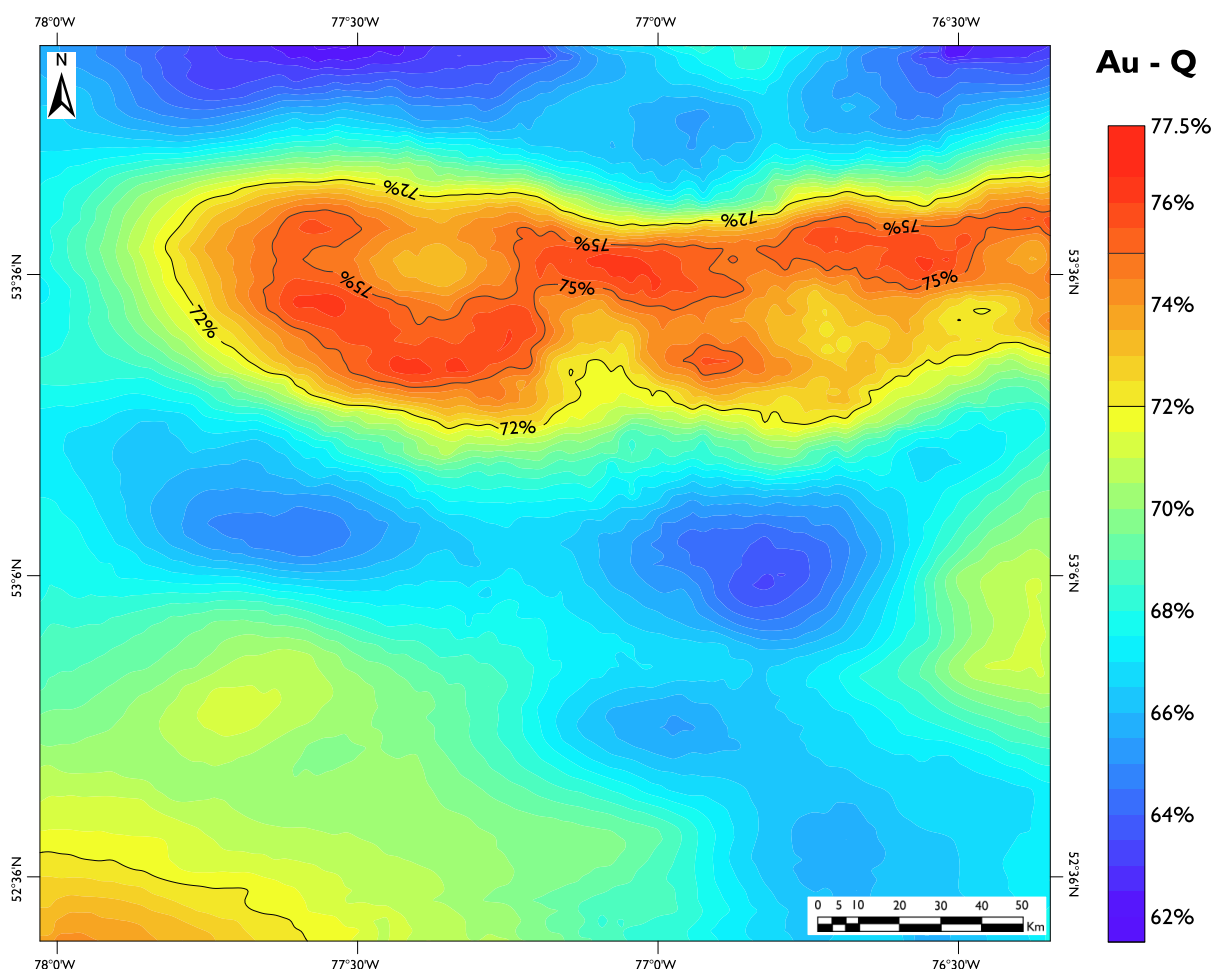
El mapa de cuartiles representa el porcentaje de probabilidad de que en una zona exista la manifestación de oro u otro mineral de interés. Esta técnica permite compactar la información estadística en un solo mapa, integrando los resultados de los componentes principales y los factores del análisis factorial (Valls, 2021).

Las variables geológicas como un cuerpo mineralizado pueden ser descritas por un variograma. El variograma permite analizar el comportamiento y la distribución espacial de una variable, así como interpretar anisotropía interna de los datos. Una vez el programa calcula el variograma experimental se ajusta al modelo teórico que más convenga, en este caso el modelo lineal (McBratney & Webster, 1986). El semivariograma muestra la autocorrelación espacial de los puntos de muestra medidos, en este caso el efecto nugget corresponde a 35.3, mientras que la pendiente linear es de 26.5 y su anisotropía es de 2. Posteriormente, se utilizó el método de interpolación de kriging a partir del variograma experimental para producir una superficie de predicción de los elementos de interés (Ver Figura 14).

El mapa evidencia que en la zona norte hay una probabilidad del 70% al 77% de encontrar manifestaciones de oro, mientras que en la esquina suroeste la probabilidad varía de 70% a 74% (Ver Figura 14). De manera general, en la zona norte se encuentran rocas arcaicas con algún grado de metamorfismo y en la esquina suroeste se encuentran rocas plutónicas intermedias a félsicas y algunas de ellas presentan algún grado de metamorfismo (Ver Figura 20). Para efectos prácticos, se tomó el área norte debido a que en ella se encuentran las zonas con mayor probabilidad de encontrar oro y con mayor densidad de lineamientos, haciendo que esta zona sea mucho más prospectable.

Figura 14.

Mapa de probabilidad del Oro realizado por la técnica de cuartiles donde el color rojo representa la mayor probabilidad de encontrar oro hasta un 77,5% y el color azul la menor probabilidad hasta un 62%. La barra de la derecha indica los porcentajes con sus colores respectivos.



5.9 Mapa de Interpolación

Se mapearon los tres componentes principales por medio del método de interpolación de kriging y se obtuvieron los siguientes mapas (**Ver Figuras 15, 16 y 17**). El mapa del componente principal 1 (**ver Figura 15**) que corresponde a los elementos (Th-U-Pb) / (Rb-Mo-Mg-K-Hg-Cs-Tl-Sc) evidencia que hay una distribución homogénea ya que los rangos de distribución son cortos. Esto refleja el carácter litófilo de los elementos. Las concentraciones más altas podrían estar



asociadas al tipo de roca. En la esquina suroeste se observan valores altos de este componente, esto concuerda con el mapa de cuartiles que también revela alta probabilidad de encontrar oro en esa zona. Asimismo, se puede observar que en la zona norte los valores de este componente son bajos.

El componente principal 2 revela que los elementos Au-W-Te-In-Hf-Mn se encuentran en la zona norte (**Ver Figura 16**), que a su vez es la zona de mayor probabilidad de encontrar manifestaciones de oro. Este componente se distribuye en rocas metasedimentarias, metavolcanicas y plutónicas arcaicas. Es importante destacar, que esta anomalía se encuentra en el contacto de la provincia Minto y La Grande, razón por la cual se sugiere un fuerte control estructural asociado a la anomalía y por tanto a la mineralización.

El mapa del componente principal 3 (**ver Figura 17**), evidencia que la mayor concentración de los elementos Co-Ni-Zn-Cd se encuentran en la zona centro sur, en rocas plutónicas que varían de félsicas a intermedias, máficas y rocas metamórficas. Asimismo, en este mismo punto se localiza el límite entre la subprovincia de Opinaca y La grande, y a su vez un sistema de fallas. Es importante resaltar que las áreas de mayor concentración de este componente son opuestas a las zonas de mayor concentración del componente principal 2, que es donde se encuentra la mineralización de interés. Por lo cual, se sugiere que la relación entre estos dos componentes principales no se encuentra vinculados.

Figura 15.

.Mapa de interpolación del componente principal 1 realizado por kriging para la asociación (Th-U-Pb) / (Rb-Mo-Mg-K-Hg-Cs-Tl-Sc). Las zonas rojas indican los lugares donde hay mayor probabilidad de encontrar esa asociación.

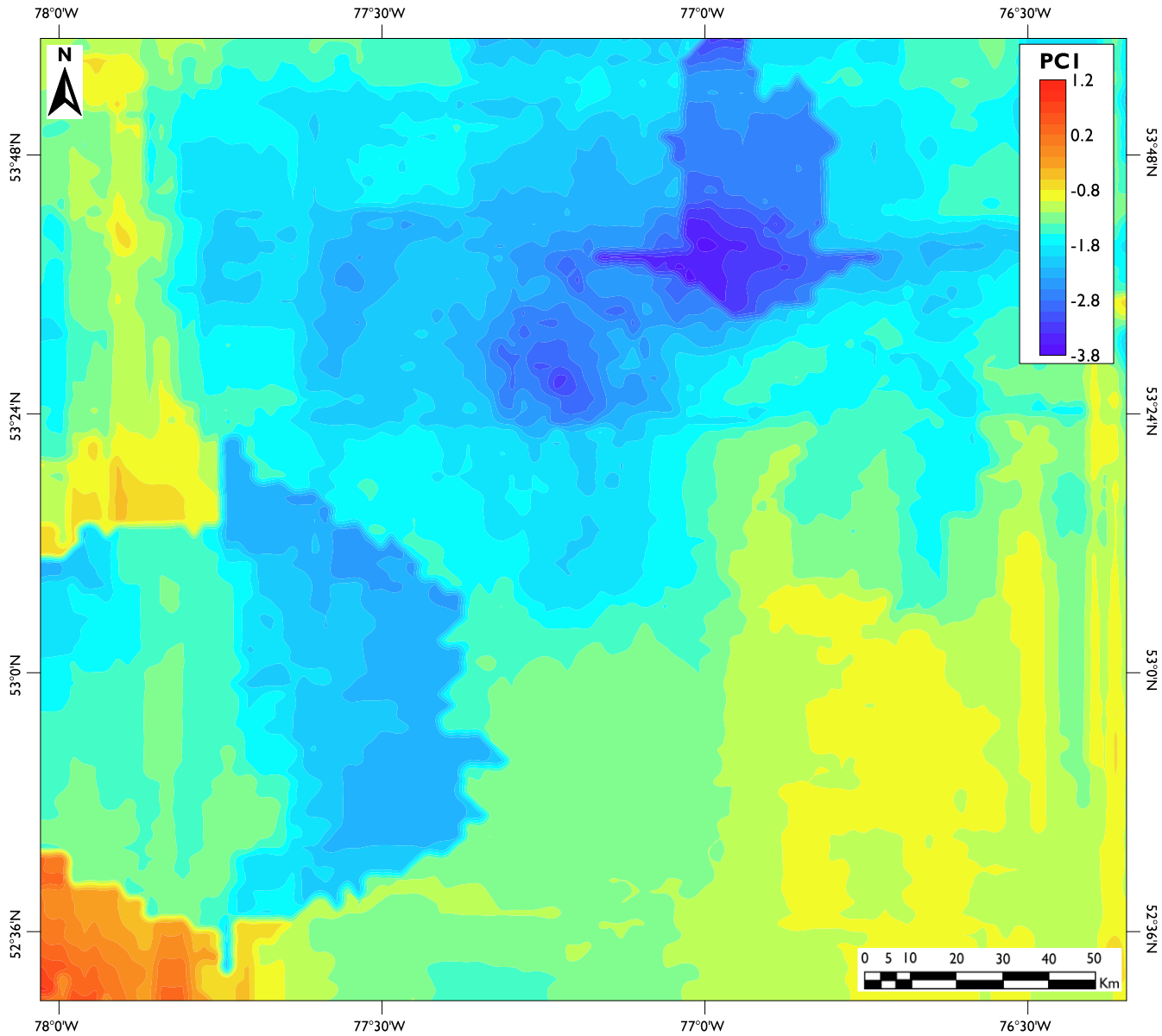


Figura 16.

Mapa de interpolación del componente principal 2 realizado por método kriging para la asociación Au-W-Te-In-Hf-Mn. Las zonas de color rojo indican los lugares donde hay mayor probabilidad de encontrar esa asociación.

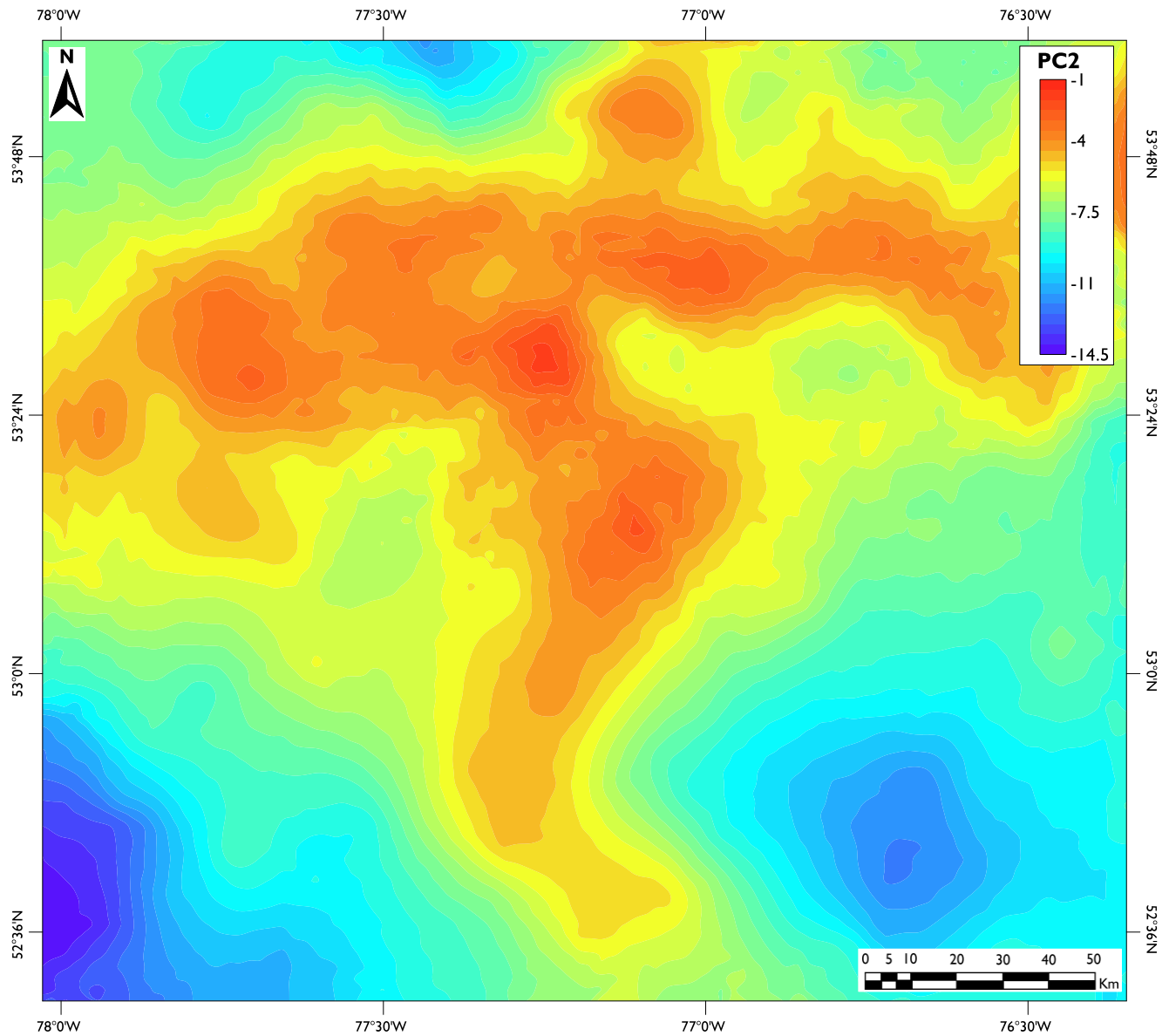
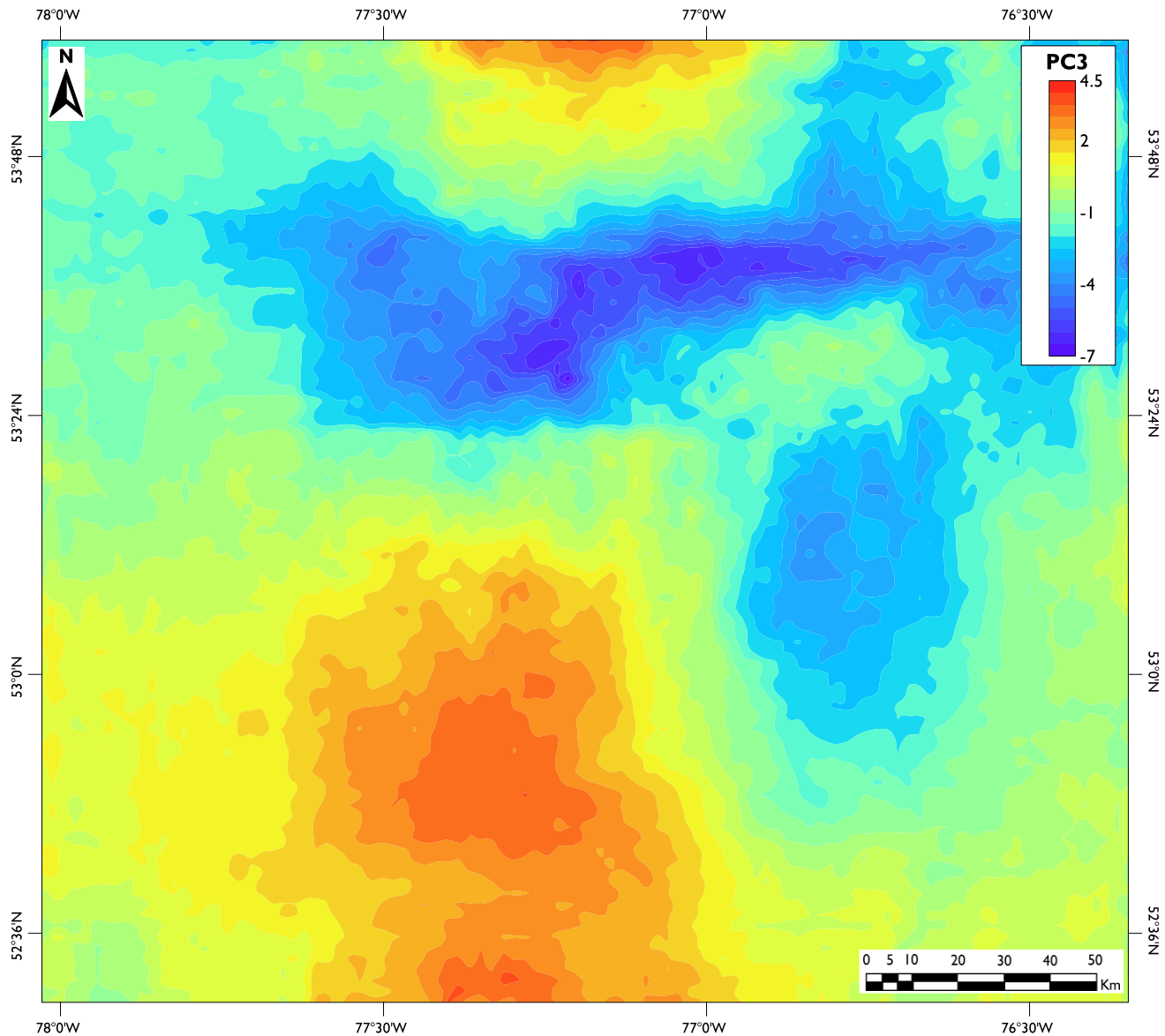


Figura 15.

Mapa de interpolación del componente principal 3 realizado por método kriging para la asociación Co-Ni-Zn-Cd. Las zonas de color rojo indican los lugares donde hay mayor probabilidad de encontrar esa asociación.



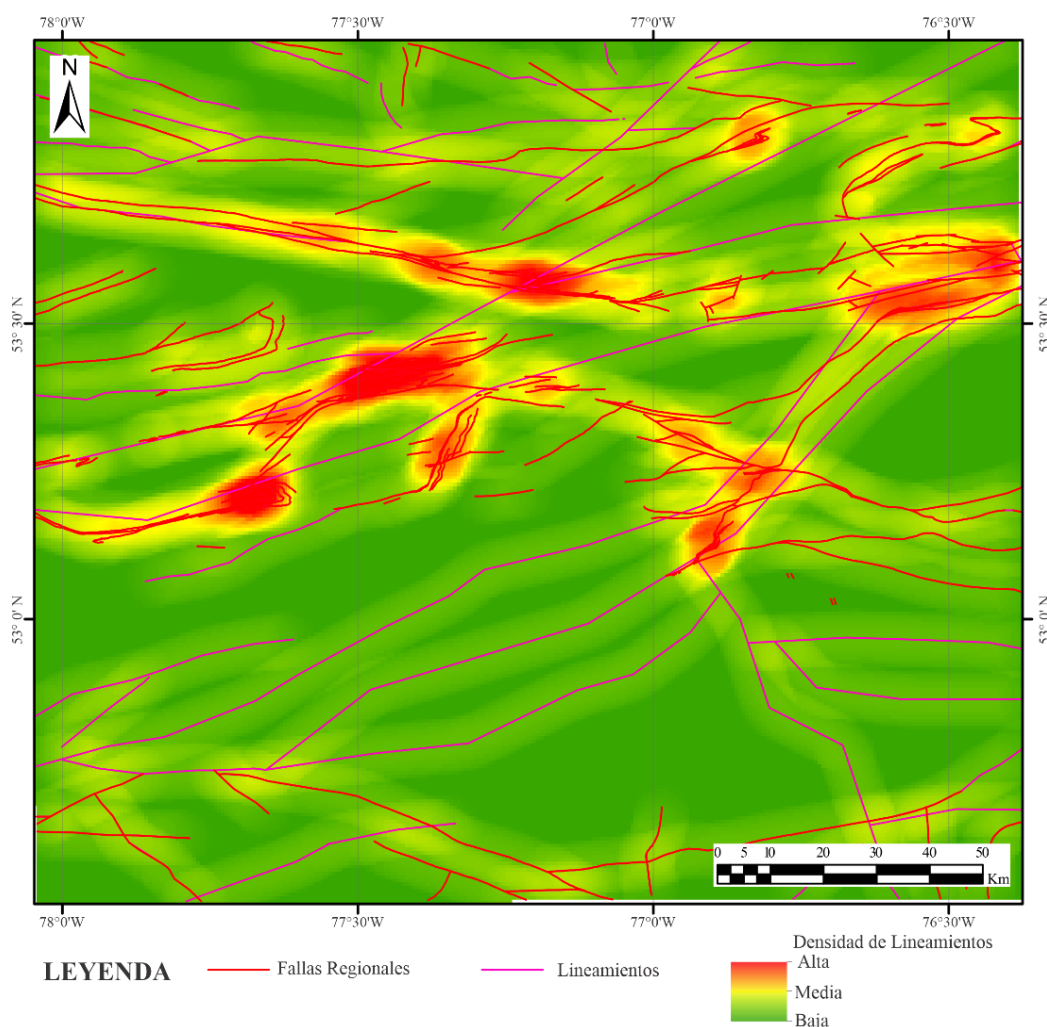
5.10 Lineamientos

A partir del análisis de datos potenciales magnetométricos y el análisis de imágenes satelitales se obtuvo que en la zona de estudio dominan 3 tendencias principales NE-SW, NW-SE y NNE-SSW.

Las áreas donde se encuentra mayor densidad de lineamientos corresponden a las zonas donde hay contrastes litológicos entre rocas ígneas plutónicas arcaicas y sedimentarias proterozoicas, y en la zona norte (principalmente en rocas ígneas plutónicas de edad neorarcaicas). (Ver Figura 18). Asimismo, en la zona noreste se concentra una mayor densidad de lineamientos que corresponde a los contactos entre las subprovincias Opinaca y Lagrande (Ver Figura 18).

Figura 18.

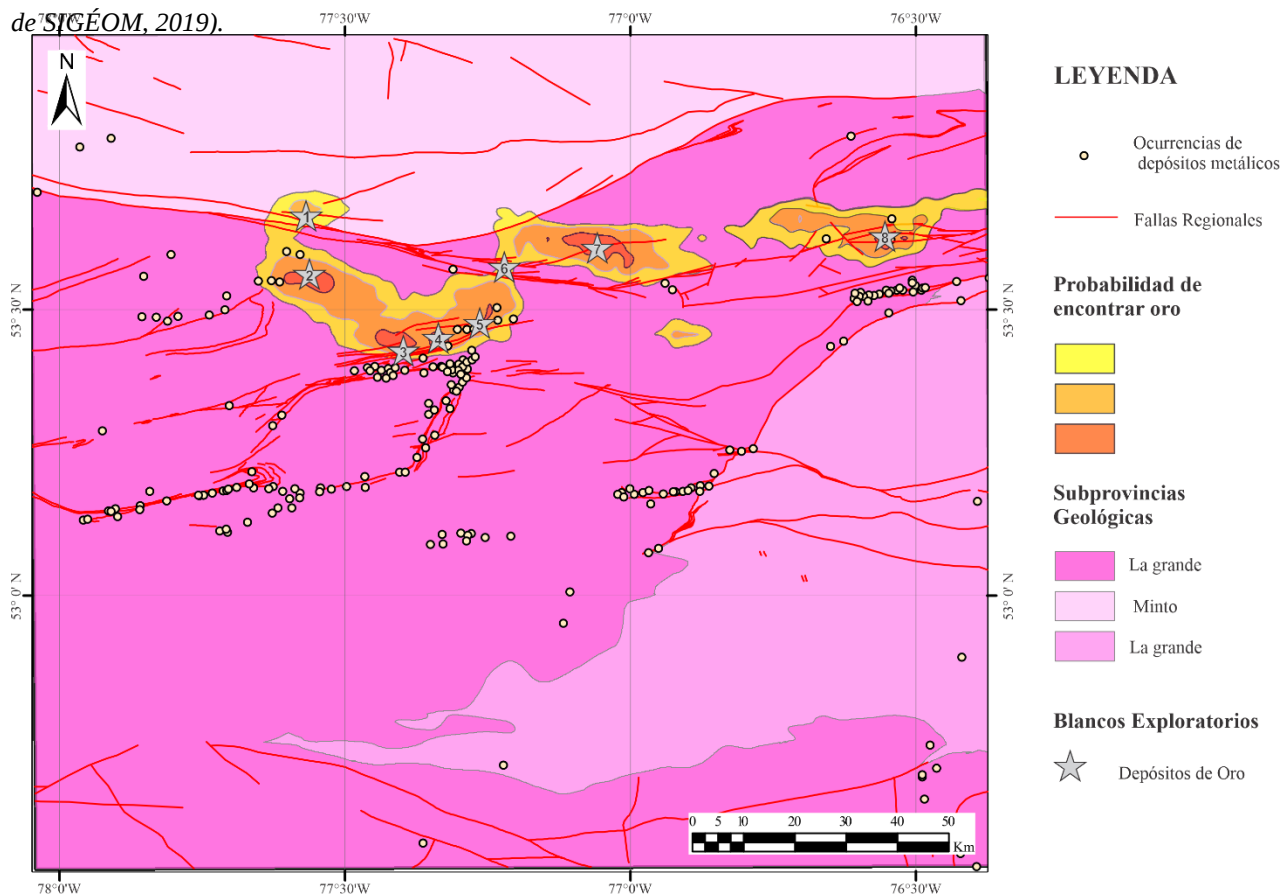
Mapa de lineamientos y fallas, donde se evidencia la densidad de los lineamientos pudiendo ser alta en rojo, media en amarillo y verde baja. Las zonas de mayor densidad son donde hay más probabilidad que se encuentren canales para los flujos mineralizantes



5.11 Mapa de Blancos Exploratorios

Figura 19.

Mapa de blancos exploratorios donde se evidencia las zonas con mayor probabilidad de encontrar oro, teniendo en cuenta los resultados estadísticos, la densidad de fallas y las ocurrencias de depósitos metálicos (tomado y modificado de SIGEOM, 2019).

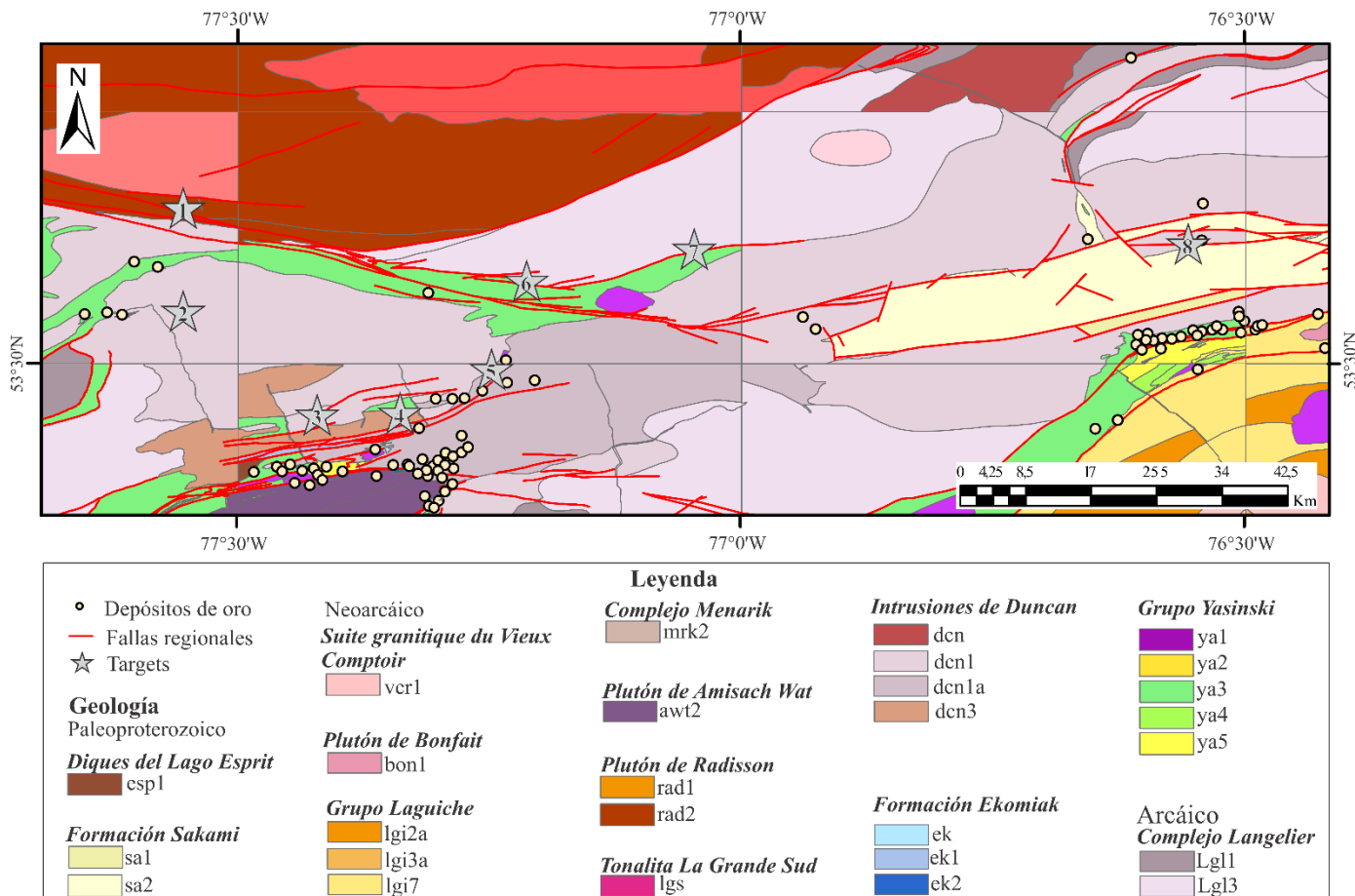


A partir de los resultados obtenidos y de la revisión bibliográfica se determinó que los depósitos de oro en esta área se asocian especialmente a las zonas de cizalla, esta fue una de las principales características para determinar los blancos exploratorios, además de las zonas de mayor probabilidad de encontrar oro según el método de cuartiles y algunos depósitos metálicos reportados por el SIGEOM. En la zona de estudio se obtuvieron 9 blancos, para una investigación más profunda, estos blancos se encuentran alojados en la subprovincia la grande y en sus límites con la subprovincia Minto (**Ver Figura 19**).

5.12 Mapa de La zona de Blancos exploratorios con la geología detallada

Figura 20.

Mapa geológico detallado de la zona de blancos exploratorios (tomado y modificado de SIGÉOM, 2019).



Los prospectos encontrados en este trabajo se encuentran en una zona que presenta una alta densidad de fallas como se observa en la **figura 18** a excepción del prospecto número 2 donde no se reportan fallas regionales al menos mapeables a la escala usada en el trabajo. La alta densidad de fallas donde se encuentran los diferentes prospectos contribuye a la circulación de fluidos hidrotermales y, por tanto, se convierten en una trampa estructural para la precipitación del oro orogénico (Edwards y Atkinson, 1986; Hagemann y Cassidy, 2000; Lavrediere, 2020). Además, es importante destacar que el prospecto 1, se encuentra en el límite fallado entre las subprovincias de Minto y La Grande (Ver figura 19 y 20).



Los prospectos 2, 3 y 5 se encuentran en las intrusiones de Duncan 1 (**Ver figura 20**). Esta unidad está compuesta por una tonalita rica en hornblenda y biotita, y se encuentra intruida por diques de gabros ([Goutier y Gigon, 2016](#)). Autores como [Hodgson y MacGeehan \(1982\)](#) encontraron en su estudio de los principales distritos mineros de oro en la Provincia Superior que el 90% de los depósitos estaban asociados a intrusiones félsicas.

El prospecto número 4 se encuentra entre la intrusión Duncan 3 y Yasinski 3 (**Ver figura 20**). De acuerdo con la literatura, la intrusión correspondiente a Duncan 3, presenta monzonita, monzodiorita, cuarzo monzodiorita y sienita. [Goutier et al., \(1998b\)](#) reportan que la epidota y la biotita cristalizan alrededor de la hornblenda y que, a su vez, se asocian a metamorfismo retrogrado. Este grupo presenta facies metamórficas de subesquistos verdes a esquistos verdes. Además, las sienitas cuya matriz es rica en minerales ferromagnesianos intruyen el grupo Yasinski y los metasedimentos de la formación Ekomiak. En la zona donde se encuentra localizado este prospecto, se han encontrado vetas de cuarzo cortando basaltos cizallados del grupo yasinki, estas vetas presentan trazas de pirita, calcopirita y pirrotita y la asocian con mineralizaciones de oro ([Goutier et al., 1998a](#)). La mineralización no solo se reporta en las vetas de cuarzo sino en fracturas de sulfuros de las rocas volcánicas, es decir que estas vetas se asocian a zonas de cizalla ([Guérin, 2017](#)).

Por otro lado, el prospecto 6 se encuentra entre el complejo Langelier y Duncan. Mientras que los prospectos 6 y 7 se encuentran entre el complejo Langelier y Yasinski 3 (**Ver figura 20**). Se ha reportado que los paragneis y las anfibolitas pertenecientes al complejo Langelier presentan oro con diseminaciones de arsenopirita, pirita y pirrotita, además de venas de cuarzo carbonato. Esto implica que podría ser una zona prospectiva de oro orogénico ([Allard et al., 2015](#)). El grupo Yasinski 3 (Ya3) está compuesto de basaltos, andesitas basálticas y anfibolitas. Este grupo se



encuentra metamorfizado incluso hasta facies anfibolitas ([Lamothe, 2008](#)). Algunos basaltos contienen biotita y granate y son altamente esquistosos. Además, se intercalan con formaciones de hierro que tienen facies de óxido dominantes. Estas facies tienen magnetita y chert recristalizado por el metamorfismo. En este grupo se reporta yacimientos de oro estratiforme tipo IV o BIF en los niveles de óxido silicato, estos niveles se encuentran oxidados en la superficie y contienen pirrotita, arsenopirita y pirita diseminada cortando venas de cuarzo - carbonato ([Goutier et al., 2000](#); [Lavrediere, 2020](#)).

El prospecto 8 se encuentra en la formación Sakami y la intrusión de Duncan 1 (**Ver figura 20**). Algunas de las intrusiones de Duncan están cubiertas de manera discordante por la Formación Sakami o en contacto de falla normal con la misma formación. La formación Sakami reporta una mineralización de Uranio Tipo 1 según [Fougues y Schumacher \(1979\)](#), que se encuentra asociada a filones polimetálicos tardíos también conocidos como mineralización de tipo "vetas de cinco elementos" (Bi-Co-Ni-Ag-As; [Kissin, 1992](#)). Este tipo de mineralización incluye los yacimientos de Cobalt y Thunder Bay en Ontario y Great Bear Lake en los Territorios del Noroeste. Estos dos tipos de mineralización de vetas proterozoicas tienen características metalogénicas y estructurales muy similares ([Goutier et al., 2000](#)).



6. Análisis de los resultados

El área de estudio es un gran productor de oro, el escudo canadiense es uno de los mayores productores de este metal a partir de depósitos hidrotermales en el terreno arcaico ([Lin et al., 2014](#); [Edwards & Atkinson, 1986](#)). De hecho, la mayor parte de la producción de oro del escudo canadiense se encuentra en la Provincia Superior, donde este metal se encuentra asociado tanto a intrusiones félsicas como a secuencias máficas volcánicas y metasedimentarias altamente deformadas ([Hodgson & MacGeehan, 1982](#)).

Los cinturones de rocas verdes (*greenstone belt*) del arcaico son una fuente potencial de metales base y oro orogénico. Diferentes autores han sugerido que la fuente de los metales incluye la desvolatilización metamórfica de las rocas metasedimentarias y metavolcánicas, fluidos magmáticos hidrotermales y fluidos meteóricos. Las rocas metavolcánicas del área de estudio tienen un gradiente metamórfico de esquistos verdes a anfibolitas y sufrieron diferentes procesos magmáticos para producir oro ([Goutier et al., 2003](#), [Gauthier et al., 2007](#); [Lamothe, 2008](#)). Las intrusiones félsicas a intermedias son huéspedes estructurales favorables debido a su fragilidad a la deformación, favoreciendo el fracturamiento y la ubicación de las vetas. Autores como [Hodgson \(1993\)](#) y [Robert et al., \(2005\)](#) han demostrado que los yacimientos de oro pueden descansar en cualquier tipo de roca. Sin embargo, relativamente pocos depósitos orogénicos de tipo oro se encuentran en rocas sedimentarias clásticas, excepto aquellos asociados con intrusiones félsicas a intermedias ([Lamothe, 2008](#)).



Los depósitos de oro orogénico están emplazados en un régimen tectónico compresivo a lo largo de márgenes activos convergentes (Groves *et al.*, 1998), (Ver figura 21). Este contexto favorece la circulación de fluidos hidrotermales a lo largo de las principales zonas de cizallamiento, que sirven como trampas estructurales para la precipitación de soluciones auríferas intermedias (Lamothe, 2008). A partir de estudios desarrollados en estas dos últimas décadas la Provincia Superior se ha considerado como un orógeno de acreción (Ver figura 21) basándose en el reconocimiento de numerosos terranos protocontinentales y oceánicos distintos que se yuxtapusieron a una escala de 2.000 km de longitud durante cinco orogenias separadas que terminaron con el magmatismo relacionado con la subducción, formaron cuencas orogénicas de flysch e imbricaron terrenos a escala de la corteza (Ver figura 21). Fragmentos separados de corteza protocontinental mesoarqueana a eoarqueana y extensiones intermedias de corteza oceánica neoarqueana se ensamblaron a través de sucesivos eventos de acreción y colisión entre 2720 y 2680 Ma, dando lugar a la alineación de primer orden hacia el este de los terrenos y las fallas transcurrentes características de la parte sur de la provincia (Percival *et al.*, 2012) esto permitió que hubiese diversos ambientes adecuados para la formación de yacimientos de oro principalmente relacionados a zonas de cizalla (Ver figura 21).

De manera general, los resultados estadísticos arrojaron cuatro asociaciones elementales: Au-Te-W-As-Hg-In-Hf; U-Th-Pb-Zr; Mg-K-Sc-Rb-Li-Cs-REE-Tl-As-S-Cu-Mo y Co-Ni-Ba-Zn-Cd-Mn. Los altos niveles de correlación en cada grupo pueden sugerir un origen común para estos elementos. Además, uno de estos grupos está claramente asociado con los depósitos de Au conocidos dentro del área de estudio.



La asociación elemental Au-Te-W-As-Hg-In-Hf representa el objetivo exploratorio y es indicativo de la mineralización. Se determinó que el elemento indicador es el Au, los elementos exploradores son As, W, Te, Hg, In Hf, estos son los indicadores de blancos para la relación directa con la mineralización en la zona de estudio según las relaciones estadísticas halladas. El oro fue probablemente transportado en forma de complejos de sulfuro, arseniuro o complejos de telurio y se encuentra íntimamente asociado con la pirita, arsenopirita y sulfosales (Boyle, 1979; Edwards & Atkinson, 1986). La asociación Au, As, Te nos indica la presencia de oro orogénico mesotermal según Groves et al., (1998). Además, el indio es un metal que se encuentra en sulfuros de cobre o en la esfalerita y se encuentra asociado a la mineralización.

Es necesario recalcar que el dendrograma ILR evidencia una alta correlación entre el Au, As, Hg, Mo, donde el arsénico podría utilizarse como indicador de la proximidad a un yacimiento mineral (Edwards & Atkinson, 1986). Incluso, Zhu et al., (2011) propuso que la asociación de Au-As es común en diferentes depósitos de oro. La alta correlación del Hg-Au, está vinculada con la presencia de Hg anómalo en algunas muestras mineralizadas de Au-Cu y sugiere que la tennantita está enriquecida en Hg en la zona de estudio (Mercier-Langevin et al., 2012).

En el área del proyecto, se reportan sulfuros diseminados, agregados de sulfuros (pirita ± calcopirita-arsenopirita) y stockworks asociados al oro. De hecho, reportan asociaciones metálicas de Au-As-Hg-W-Ag-Cd y una asociación de Bi-Cu (Mercier-Langevin et al., 2012). En los depósitos de oro orogénico es común encontrar enriquecimiento de S, As, Bi, Te, los cuales no muestran una movilidad significativa durante el metamorfismo, a excepción del As, que muestra disminuye ligeramente su concentración a medida que aumenta el metamorfismo (Pitacairn et al.,



2019). Su abundancia en los cinturones de rocas verdes combinada con la movilidad observada de Au en estas rocas durante el metamorfismo indica que las rocas metavolcánicas como las del grupo Yasinki de los prospectos encontrados pueden ser importantes fuentes potenciales de Au en los depósitos de oro orogénico alojados en el cinturón de rocas verde del Arcaico (**Ver figura 21**). En el área del proyecto, un gran número de yacimientos aurífero se encuentra diseminado y asociado con arsenopirita, pirrotita, calcopirita y lollingita (Gauthier & Laroque, 1998; Chartrand & Gauthier, 1995; Lamothe, 2008; Darabi-Golestan & Hezarkhani, 2019). Esto confirma que los diversos métodos estadísticos aplicados en este trabajo evidencian las asociaciones minerales de los depósitos. Además, se encontró que existe una alta cantidad y variedad de depósitos de oro según distintos trabajos anteriores del SIGEOM.

El oro que se encuentra en el área de estudio no solo se encuentra relacionado a depósitos de oro orogénico, sino a mineralizaciones sedimentarias tipo placer como la formación Apple, que presenta niveles lenticulares de arenisca gruesa y conglomerados con guijarros de cuarzo y matriz de pirita situados en la parte superior de esta formación. Los conglomerados también se caracterizan por valores anómalos de As, Cu, Ni, Co, Cr, Pb y, localmente, Au <260 ppb Au (Paquette, 1997; Goutier *et al.*, 2000). Es necesario destacar que el oro también se encuentra en yacimientos de oro estratiforme tipo IV o BIF en los niveles de óxido silicato, estos niveles se encuentran oxidados en la superficie, contienen pirrotita y pirita diseminada en el grupo Yasinki (Goutier *et al.*, 2000). En el grupo Laguiche se reportan yacimientos de oro alojados en formaciones de hierro de facies óxido-silicato-óxido y han sido descritos en detalle por Fallara *et al.*, (1999), Larocque (1999), se extienden lateralmente de forma más o menos continua a lo largo de unos 800 m en dirección SO. El contenido de sulfuros (pirrotita, arsenopirita $\pm$ calcopirita) es



generalmente bajo (<5%), pero puede alcanzar hasta el 30% en algunos lugares. El grafito se reporta localmente ([Goutier et al., 2000](#)).

Además, algunas de las intrusiones de Duncan (**Ver Figura 21**) presentan un sistema de vetas de cuarzo-turmalina dentro de una diorita de cuarzo foliada cerca al contacto de los basaltos y son consideradas como vetas auríferas mesotermales con ganga de cuarzo y carbonatos ([Goutier et al., 1998a; 2000](#)). Asimismo, se ha reportado que la mineralización se asocia a zonas de cizalla en el contacto entre los diques de gabro del complejo Menarik y la tonalita foliada, inclusive dentro de los diques, pero siempre paralelos o cerca del contacto con la roca huésped, es decir, las intrusiones de Duncan ([Goutier et al., 1998a](#)). De acuerdo con [Bussieres y Richard \(2009, 2011\)](#) hay mineralizaciones tanto de vetas auríferas orogénicas como polimetálicas asociada a vetillas y vetas de cuarzo. La mineralización de oro es diseminada, generalmente se asocia con la arsenopirita, esta última puede estar diseminada o masiva, pirita, calcopirita, fuscita, pirrotita, gersdorffita, esfalerita, galena, malaquita tetraedrita y se encuentra asociado a cuarzo, clorita, sericita, albita, esfena y carbonato ([Gauthier et al., 1997; Goutier et al., 1998a](#)). Las rocas huésped presentan una intensa sericitización y en algunos lugares silicificación, hay áreas que se encuentran oxidadas, especialmente a lo largo de las zonas de cizallamiento (**Ver figura 18 y 20**). La silicificación es moderada y la cloritización esporádica en las zonas deformadas. En la tonalita, la mineralización está asociada con la alteración de la sericita. En el gabro se acompaña de alteración zonada de clorita evolucionando hacia el conjunto sericita-albita-esfena $\pm$ fuscita. El carbonato está presente en pequeñas cantidades. La evidencia textural de las rocas indica que la deformación observada en las zonas mineralizadas se superpone al conjunto de alteración ([Gauthier et al., 1997; Bussieres y Richard, 2009, 2011](#)).



La asociación elemental U-Th-Pb-Zr como resultado de los diferentes métodos estadísticos; podría representar el emplazamiento generalizado de granitos y pegmatitas post-tectónicos de pequeño volumen tuvo lugar a lo largo de la Provincia Superior principalmente entre 2670 y 2620 Ga, unos 30 a 50 M.a. después de colisiones definidas (**Ver figura 21**) ([Corkery et al., 1992, 1995](#); [Goutier et al., 2000](#); [Smith et al., 2004](#)). Estas rocas leucocráticas están altamente enriquecidas en elementos productores de calor (uranio, torio, potasio), contienen abundante circón heredado y se derivado de fuentes de la corteza sin un aporte significativo de material del manto ([Larbi et al., 1999](#); [Whalen et al., 2004a en Percival et al., 2012](#)). Además, esto también podría representar las mineralizaciones de uranio, las cuales se encuentran altamente relacionadas con las de oro. Quebec tiene potencial en mineralización de uranio, que puede estar asociado con areniscas, conglomerados, rocas ígneas o metamórficas ([Jébrak y King, 2014](#)).

Una de las posibles fuentes de U, Pb y Zr en el área de estudio se encuentra en la formación clástica Apple, que alberga yacimientos de uranio-oro ([Roscoe y Donaldson, 1988](#)). En la parte superior de esta secuencia clástica, en areniscas cuarzosas, se encontró niveles lenticulares de conglomerados con guijarros de cuarzo, en una matriz pirítica y de uranio (principalmente urarininita) y forman agregados en los que frecuentemente se observa galena diseminada muy fina. El plomo en esta formación está relacionado con el uranio, así como lo evidencian los diferentes métodos estadísticos. Los principales minerales accesorios de los horizontes uraníferos son la pirita y el circón ([Paquette, y Gauthier, 1997](#)). Otra fuente importante podría ser la formación proterozoica Sakami, en el sector de Duniot y Grosse Baleine se encontraron algunos yacimientos de uranio en la unidad basal de esta formación, cerca de las fallas principales, estas mineralizaciones se relacionan con la inconformidad en la base de la Formación Sakami ([Goutier et al., 2000](#)).



La asociación elemental Mg-K-Sc-Rb-Li-Cs-REE-Tl-As-S-Cu-Mo se puede subdividir en dos grupos. El primero se conforma de elementos litófilos como Mg-K-Sc-Rb-Li-Cs que presentan afinidad por los silicatos, se encuentran concentrados en la corteza, se pueden encontrar en minerales esenciales como el feldespato potásico, y minerales accesorios como los anfíboles, biotita, clorita, entre otros. Estos elementos se pueden presentar en altas concentraciones debido a que controlan en gran medida la cristalización de los minerales petrogenéticos en las rocas a partir de fundidos. Sumado a esto, en la zona se reportan pegmatitas LCT (Li-Cs-Ta), pegmatitas ricas en litio, esta es la razón por la que se explica la asociación del litio, cesio, escandio, talio e inclusive las tierras raras ([Černý, 1991](#); [Fontaine et al., 2015](#)).

El segundo grupo se conforma de elementos calcófilos como As-Tl-S-Cu-Mo (excepto el Mo), que tienen baja afinidad por el oxígeno y alta afinidad por la unión con el azufre o el sulfuro. Es probable que esta asociación indique la presencia de minerales como la arsenopirita y minerales con sulfuros tales como los que han reportado [Lamothe \(2008\)](#); [Chapon et al., \(2010\)](#); [Mercier-Langevin et al., \(2012\)](#) y [Fontaine et al., \(2015\)](#). Aunque el molibdeno no se considera generalmente un indicador de la presencia de depósitos de oro, este elemento muestra una asociación espacial positiva con los depósitos de la Bahía James ([Lamothe, 2008](#)). Asimismo, los fluidos hidrotermales magmáticos pueden ser fuentes locales importantes de metales en depósitos enriquecidos en Mo, Bi y Te ([Pitcairn et al., 2017](#)).

El talio se asocia con el potasio en arcillas, suelos, granitos y como elemento traza en la pirita, arsenopirita y cinabrio ([Xiao et al., 2004](#)), estos minerales son comunes de encontrar en el área del proyecto. Este elemento aparece como impureza en seleniuros, sulfuros y sulfatos, suele aparecer en yacimientos de sulfuros y forma parte de las menas de As, Sb, Cu, Pb, Fe, Au, Zn, Cd y Hg. De manera que, puede dar origen a altas concentraciones en el medio exógeno a través de la



meteorización natural y/o la actividad minera (Sobott, 1993; Pais & Benton, 1997) y se encuentra relacionado con la mineralización.

El azufre se encuentra estrechamente relacionado con todos los minerales y mineralizaciones de sulfuros. El comportamiento de este elemento durante la diferenciación magmática también controla fuertemente la disponibilidad de elementos calcófilos para una removilización metamórfica posterior con rocas volcánicas subsaturadas de azufre que comúnmente muestran concentraciones más altas de Au (Patten *et al.*, 2016).

En la zona noreste se reportan cinco estilos de mineralización que incluyen desde sulfuros diseminados en la tonalita, diques máficos, xenolitos y brechas ricas en biotita, hasta vetas de cuarzo-turmalina y cuarzo-carbonato (Mercier-Langevin *et al.*, 2012). Además, se reportan vetas de sulfuro y stockworks compuestos principalmente de pirita y calcopirita con cantidades menores de tennantita y arsenopirita, y trazas de sulfosales nativos de Au y Bi $\pm$ Bi nativo (Mercier-Langevin *et al.*, 2012). El Au nativo se encuentra comúnmente en los límites de los granos de sulfuro con trazas de Fe, Cu, Ni y As, sulfuros menores diseminados o agregados de sulfuros (pirita $\pm$ calcopirita-arsenopirita) están presentes en estas vetas junto con el Au nativo (Mercier-Langevin *et al.*, 2012).

La asociación elemental Co-Ni-Ba-Zn-Cd-Mn indica la posible presencia de un depósito polimetálico como la mineralización de tipo "vetas de cinco elementos" (Bi-Co-Ni-Ag-As; Kissin, 1992) encontradas en la zona de estudio. Elementos como el Ba, Cd, Zn son calcófilos, tienen afinidad por el azufre, y han sido reportados concentrados en sulfuros (Mercier-Langevin *et al.*, 2012). Las asociaciones fuertes de la mayoría de los elementos calcófilos son compatibles con la presencia de minerales de sulfuro, especialmente pirita y calcopirita en los sedimentos



(Khorasanipour *et al.*, 2011). Elementos como el Ni, Co son considerados elementos siderófilos según Goldschmidt (1937) y normalmente se asocian a rocas ultramáficas, vulcanitas, basalto y basaltos andesíticos, es decir que se pueden asociar con el grupo Yasinki e intrusiones de piroxenita metamórfica (Goutier *et al.*, 2000). En las piroxenitas, el piroxeno ha sido sustituido por la serpentinización general, el talco y los carbonatos, además se han observado una red irregular de vetas de serpentina y crisotilo. Aunque no se ha reportado ninguna mineralización de cromita, varias muestras han mostrado un alto han mostrado altos valores de cromo según Goutier *et al.*, (2000).

Integrando los diferentes métodos estadísticos, el mapeo de cuartiles y consultando la bibliografía se encontró que, en las zonas de mayor probabilidad de encontrar oro hay depósitos que han sido clasificados como depósitos de metales preciosos incluyendo oro orogénico, (Chapon *et al.*, 2010; Mercier-Langevin *et al.*, 2012), vetas de metales preciosos, formaciones de hierro bandeado y oro tipo placer (Moorhead *et al.*, 2000; Richer-Laflèche *et al.*, 2000).

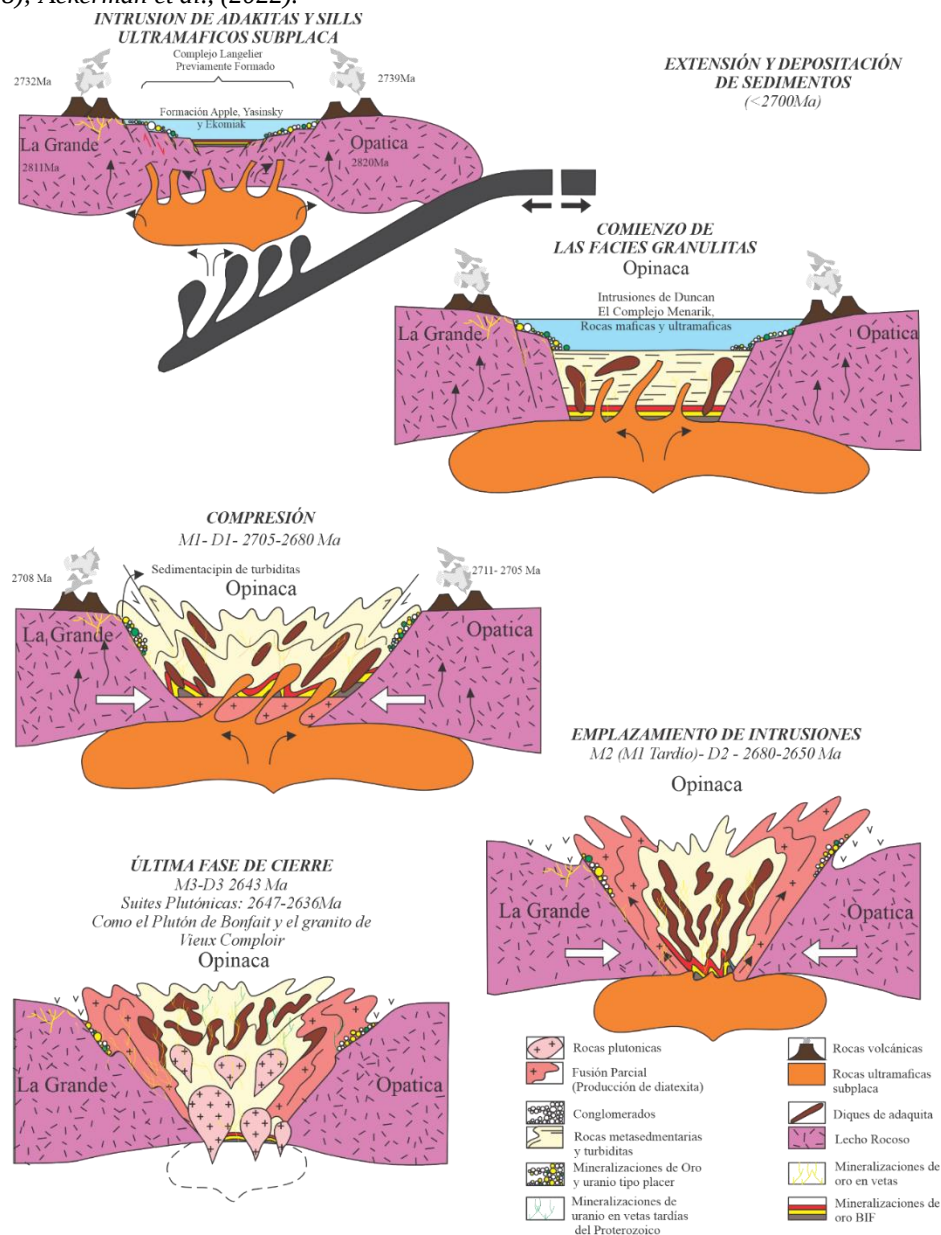
La presencia de fallas, el contacto entre subprovincias, el contacto entre las distintas litologías y la presencia de minerales indicadores son unos de los factores geológicos más importantes a la hora de buscar nuevos blancos de exploración. De hecho, los distritos mineros canadienses están asociados con zonas de fallas (Hodgson & MacGeehan, 1982). La estructura dominante en el área de estudio es la zona de cizalla de rumbo dextral ESE (Goutier *et al.*, 1999). Los estudios detallados de las mineralizaciones y las observaciones de campo muestran que el emplazamiento de la mineralización de oro en el área de estudio se generó a lo largo de los 5 eventos geológicos como se observa en la **figura 21** (Goutier *et al.*, 2000; Card y Ciesielski, 1986; Goutier *et al.*, 2001; Caderón, 2003; Côté-Roberge, 2018), En el apartado del Marco geológico se

explica de manera detallada la evolución geológica del área, la cual evidencia que hay superposición de eventos y por lo tanto de mineralizaciones, de ahí la complejidad de esta zona.

En la **figura 21** se representa de manera gráfica y sencilla cómo se desarrollaron los eventos geológicos que dieron origen a las mineralizaciones de oro y uranio en la zona de estudio.

Figura 21

Esquema de la evolución geológica de los cinco eventos más importantes de la zona de estudio. Imagen tomada y modificada de: Card y Ciesielski (1986); Goutier et al., (2001); Caderón, (2003); Coté-Roberge, (2018). Sapin et al., (2018); Ackerman et al., (2022).





7. Conclusiones

- En este trabajo, se evidencia como la exploración geoquímica es un método de gran utilidad para identificar anomalías asociadas con la mineralización por medio del procesamiento estadístico de datos geoquímicos.
- A partir de los métodos estadísticos multivariantes se indicaron las asociaciones geoquímicas y se demostró que integrar diferentes técnicas estadísticas provee un conocimiento geoquímico de la mineralización. Además, las correlaciones estadísticas no solo revelaron los yacimientos relacionados a oro, sino también algunas mineralizaciones de uranio y polimetálicos.
- A partir de las diferentes técnicas multivariantes se los elementos se clasificaron en 4 grupos, Au-Te-W-As-Hg-In-Hf, U-Th-Pb-Zr, Mg-K-Sc-Rb-Li-Cs-REE-Tl-As-S-Cu-M y Co-Ni-Ba-Zn-Cd-Mn, los cuales fueron asociados a mineralizaciones de oro de distinto origen, mineralizaciones de Uranio en depósitos sedimentarios, elementos relacionados con la roca caja y algunas pegmatitas y filones polimetálicos.
- Elementos como Au-Te-W-As-Hg-In-Hf están positiva y excelentemente correlacionados, muestran una fuerte asociación tanto en el biplot como en los factores, además, representan la mineralización de interés y el objetivo exploratorio en este proyecto de investigación. El análisis factorial en este estudio revela que los elementos polimetálicos del yacimiento de oro son: Au-Te-W-As-Hg-In-Hf los cuales fueron relacionados a unidades litológicas: el grupo Yasinski, a las intrusiones de Duncan y el grupo Laguiche; el oro en los grupos Yasinski y Laguiche se asocian a BIF y oro orogénico y en Las intrusiones de Duncan yacimientos en vetas tipo las cuales fueron clasificadas como potencial fuente de oro según



[Goutier et al., \(2000\)](#). Estas relaciones permiten determinar que estas litologías son fuente de prospección.

- El mapa de cuartiles reveló una fuerte correlación entre las anomalías de oro y las zonas de cizalla en el área de estudio, además reafirmó la presencia de las unidades litológicas descritas por [Goutier et al., \(2000\)](#) como fuente de oro en el área con mayor probabilidad de encontrar depósitos de oro.
- Con la integración de los diferentes resultados de las diferentes técnicas se proponen 8 posibles blancos exploratorios para yacimientos de oro, estos se encuentran asociados a las zonas de falla, las zonas con mayor probabilidad de encontrar oro según el mapeo de cuartiles y las litologías más prospectivas.
- Se comprobó que los métodos estadísticos funcionan y pueden ser extrapolados a Colombia, no solo para minería sino también para otras aplicaciones como la geología ambiental, médica y geología de hidrocarburos entre otras disciplinas a fines.

8. Recomendaciones

Se recomienda implementar otras técnicas de exploración minera tales como la teledetección, geofísica, modelamiento, machine learning, pozos de perforación y campañas de campo para evaluar la fiabilidad de los blancos encontrados en este trabajo de investigación, determinar las dimensiones de los cuerpos mineralizados y reafirmar la presencia de estos depósitos. Asimismo, se recomienda evaluar los tenores de los yacimientos para estimar si son rentables económicamente e implementar estudios socioambientales para evaluar la viabilidad de un proyecto minero en el área de estudio.



Bibliografía

- Aitchison, J. (1984). The statistical analysis of geochemical compositions. *Mathematical Geology*, 16, 531–564. [Doi: 10.1007/BF01029316](https://doi.org/10.1007/BF01029316)
- Aitchison, J. (1986). *The Statistical Analysis of Compositional Data*. Chapman & Hall, London.
- Aitchison, J. (1999). Logratios and natural laws in compositional data analysis. *Mathematical Geology*, 31, 563–589. [Doi: 10.1023/A:1007568008032](https://doi.org/10.1023/A:1007568008032)
- Aitchison, J. y J. Egozcue, J. (2005). Compositional Data Analysis: Where Are We and Where Should We Be Heading?. *Mathematical Geology*, 37, 829–850. [Doi: 10.1007/s11004-005-7383-7](https://doi.org/10.1007/s11004-005-7383-7)
- Allard, G., Goutier, J., Lamothe, D. (2015). Évaluation du potentiel en minéralisations d'or de type orogénique, municipalité d'Eeyou Istchee Baie-James (version 2014). Ministère des Ressources naturelles, Québec, 1, 42.
- Bandyarera, D., Rhéaume, P., Maurice, C., Bédard, E., Morfin, S. y Sawyer, E., (2010). Synthèse géologique du secteur du réservoir Opinaca, Baie-James. *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; RG 2010-02*, 1, 46.
- Bandyayera, D., Burniaux, P. y Morfin, S. (2011) Géologie de la région du lac Brune (33G07) et de la baie Gavaudan (33G10). *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec; RP-2011-01*, 2, 25.
- Bandyayera, D., Burniaux, P., Morfin, S. (2011). Géologie De La Région Du Lac Brune (33g07) Et De La Baie Gavaudan (33g10), Ministère Des Ressources Naturelles Et De La Faune, Québec; Rp 2011-01, 25.
- Bellehumeur, C., Marcotte, D. y Jébrak, M. (1994). Multi-element relationships and spatial structure regional geochemical data from stream sediments southwestern Quebec, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(1), 11-35. [Doi:10.1016/0375-6742\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90003-5)
- Bohling, G. (2007). Introduction to geostatistics. *Kansas Geological Survey Open File Report*, 26, 50.
- Borradaile, G. (2003). *Statistics of Earth Science Data their distribution in time, space, orientation*. New York, United States: Springer-Verlag. 371. [Doi:10.1007/978-3-662-05223-5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05223-5)
- Boyle, R. (1979). The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element). *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 280, 584, 1 CD-ROM, [Doi: 10.4095/105577](https://doi.org/10.4095/105577)



- Buchan, K. y Ernst, R. (2004). Essaims de dykes de diabase et unités apparentés au Canada et dans les régions avoisinantes. *Commission géologique du Canada, carte 2022A, échelle de 1/5 000 000*.
- Bussieres, Y. y Richard, L. (2009). Cartographie et prospection 2008, propriété Menarik, Région de la Baie de James. Ressources Minières Pro-Or inc., 138.
- Bussieres, Y. y Richard, L. (2011). Cartographie et prospection, propriété Menarik, Région de la Baie de James. Ressources Minières Pro-Or inc, 237.
- Card, K. (1990). A review of the Superior Province of the Canadian Shield, a product of Archean accretion. *Precambrian Research*, 48, 99-156.
- Card, K. y Poulsen, K. (1998). Geology and mineral deposits of the Superior Province of the Canadian Shield. In: *Geology of the Precambrian Superior and Grenville Provinces and Precambrian Fossils in North America* (Lucas, S. and St-Onge, M.R., co-ordinators). *Geological Survey of Canada; Geology of Canada*, 7, 15-232.
- Card, K., y Ciesielski, A. (1986). Subdivisions of the Superior province of the Canadian Shield. *Geoscience Canada*, 13, 5-13.
- Carranza, E. (2011). Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*, 110 (2), 167-185. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2011.05.007](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.007)
- Černý, P. (1991). Fertile granites of precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies?; *precambrian research*, 51, 429–468. [Doi: 10.1016/0301-9268\(91\)90111-m](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90111-m)
- Černý, P. y Ercit, T. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2005–2026. [Doi: 10.2113/gscanmin.43.6.2005](https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2005)
- Chapon, B., Jébrak, M., Ross, P.-S., y Stevenson, R. (2010). Le système porphyrique à molybdène de Tilly: Final report to DIVEX, SC36 subproject, 15.
- Clarck, T. (1984). Géologie de la région du lac Cambrien, Territoire du Nouveau-Québec. *Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; ET 83-02*, 1, 77.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R. y Savard, M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353, 294–313. [Doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015)
- Comas-Cufí M y Thió-Henestrosa S. (2011). CoDaPack 2.0: a stand-alone, multi-platform compositional software. En: Egozcue JJ, Tolosana-Delgado R, Ortego MI, eds. *CoDaWork'11: 4th International Workshop on Compositional Data Analysis*. Sant Feliu de Guíxols.



- Comas-Cufí M. y Thió-Henestrosa S. (2011). CoDaPack 2.0, Universitat de Girona. Available at <http://ima.udg.edu/codapack/>
- Corkery, M., Davis, D., Lenton, P. (1992) Geochronological constraints on the development of the Cross Lake greenstone belt. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29. 2171–2185.
- Darabi-Golestan, F. y Hezarkhani, A. (2019). Multivariate analysis of log-ratio transformed data and its priority in mining science, porphyry and polymetallic vein deposits case studies. *Bulletin of Mineral Research and Exploration*, 159, 185-200. Doi: [10.19111/bulletinofmre.456958](https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.456958)
- Davis, J. (2002). *Statistics and Data analysis in Geology*. (3ª ed.). New York, United States: John Wiley & Sons, Inc. 326.
- Delgado, O. y Martínez, J. (2015). Elaboración del mapa de ruido del área urbana de la Ciudad de Cuenca–Ecuador, empleando la técnica de interpolación geoestadística Kriging ordinario. *Ciencias Espaciales*, 8(1), 411-440.
- Eade, K. (1966). Fort George and Kaniapiskau river (west half) map-areas, New Quebec. *Geological Survey of Canada; Memoir* 339, 84.
- Eade, K., Heywood, W. y Lee, H. (1957) Sakami Lake area, New Quebec. *Geological Survey of Canada; map* 23- 1957.
- Edwards, R. y Atkinson, K. (1986). *Ore deposit geology and its influence on mineral exploration*. London, Chapman and Hall Ltd. Doi: [10.1007/978-94-011-8056-6](https://doi.org/10.1007/978-94-011-8056-6)
- Egozcue, J. y Pawlowsky-Glahn, V. (2005). Groups of parts and their balances in compositional data analysis. *Mathematical Geology*, 37 (7), 795– 828. Doi: [10.1007/s11004-005-7381-9](https://doi.org/10.1007/s11004-005-7381-9)
- Egozcue, J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G. y Barcelo-Vidal, C. (2003). Isometric logratio transformations for compositional data analysis. *Mathematical Geology* 35 (3), 279–300. Doi: [10.1023/A:1023818214614](https://doi.org/10.1023/A:1023818214614)
- Ernst, R., Buchan, K., Goutier, J., Leclair, A. y Lamothe, D. (1998). Reconnaissance paleomagnetic study of diabase dykes of James Bay and Ashuanipi regions of Quebec. Programme et résumés, réunion conjointe: Association géologique du Canada, Association minéralogique du Canada, Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec, *Association internationale des hydrogéologues et Union géophysique canadienne* A-53.
- Ernst, R., Buchan, K., Goutier, J., Leclair, A., Lamothe, D. (1998). Reconnaissance Paleomagnetic Study Of Diabase Dykes Of James Bay And Ashuanipi Regions Of Quebec. Programme Et Résumés, Réunion Conjointe : Association Géologique Du Canada, Association Minéralogique Du Canada, Association Professionnelle Des Géologues Et Des Géophysiciens Du Québec, *Association Internationale Des Hydrogéologues Et Union Géophysique Canadienne*. 53.



- Fallara, F., Moorhead, J., Ross, P. y Goutier, J. (1999) Caractéristiques et potentiel pour les minéralisations de type sulfures massifs volcanogènes des séquences volcaniques du lac Sakami et de la rivière Eastmain. *Ministère des Ressources naturelles, Québec*; MB 99-37, 130.
- Fallara, F., Moorhead, J., Ross, P. y Goutier, J. (1999). Caractéristiques et potentiel pour les minéralisations de type sulfures massifs volcanogènes des séquences volcaniques du lac Sakami et de la rivière Eastmain. *Ministère des Ressources naturelles, Québec*; 99-37, 130.
- Feltrin, L. y Bertelli, M. (2019). Using clustered heat maps in mineral exploration to visualize Volcanic-Hosted Massive Sulfide Alteration and Mineralization. *Natural Resources Research*, 29, 311-344. [Doi: 10.1007/s11053-019-09586-2](https://doi.org/10.1007/s11053-019-09586-2)
- Filzmoser, P., Hron, K. y Reimann, C. (2012). Interpretation of multivariate outliers for compositional data. *Computers and geosciences*. 39, 77–85. [Doi: 10.1016/j.cageo.2011.06.014](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.06.014)
- Fontaine, A., Dubé, B., Malo, M., McNicoll, V., Brisson, T., Doucet, D., y Goutier, J. (2015). Geology of the metamorphosed Roberto gold deposit (Éléonore Mine), James Bay region, Quebec: diversity of mineralization styles in a polyphase tectonometamorphic setting. En: Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration, (ed.) B. Dubé and P. Mercier-Langevin; Geological Survey of Canada, Open File 7852, 209–225.
- Fougues, J., Schumacher, F. (1979) Assessment Files, *MERQ, Rapport de Synthèse du Permis*, 75.
- Fouques, J. y Schumacher, F. (1979). Rapport de synthèse des travaux réalisés depuis 1974 jusqu'au 31 décembre 1978 sur le permis SES. *Rapport statutaire déposé au ministère des Ressources naturelles, Québec*; GM 37017, 157, 19, 57.
- García, O. y 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.
- Gauthier, M. y Laroque, M. (1998). Cadre géologique, style et répartition des minéralisations métalliques de la Basse et de la Moyenne Eastmain, territoire de la Baie James. *Ministère des Ressources naturelles*; MB 98-10, 86.
- Gauthier, M., Larocque, M. y Chartand, F. (1997). Cadre géologique, style et répartition des minéralisations métalliques du bassin de La Grande Rivière, Territoire de la Baie James. *Ministère des Ressources naturelles*; MB 97-30, 74.
- Gauthier, M., Trepanier, S. y Gardoll, S. (2007). Metamorphic gradient: A regional-scale area selection criterion for gold in the northeastern Superior province, eastern Canadian Shield: *SEG Newsletter*, 69, 10–15, [Doi: https://doi.org/10.5382/SEGnews.2007-69](https://doi.org/10.5382/SEGnews.2007-69)
- Gill, J. (1949). Natural divisions of the Canadian Shield. *Royal Society of Canada Transactions*, 43, 61-69.



- Girard, R., (1996). Géologie et évaluation des permis d'exploration : Sakami, Lac Amélie, Lac au Caribou, Mills, etc. *Rapport statutaire déposé au ministère des Ressources naturelles, Québec; GM 54440*, 29, 453.
- Gluhak, T. y Rosenberg, D. (2013). Geochemical discrimination of basaltic sources as a tool for provenance analyses of bifacial tools in the southern Levant: first results from the Jezreel Valley, Israel. *Journal of Archaeological Science*, 40(3), 1611–1622. [Doi: 10.1016/j.jas.2012.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.11.003)
- Goldschmidt, V. (1937). "The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society". *Journal of the Chemical Society*, 655–673. [Doi:10.1039/JR9370000655](https://doi.org/10.1039/JR9370000655).
- Goutier J., y Gigon, J. (2016). Géologie de la région du lac Sakami. *Ministère des Ressources Naturelles, Québec; CG 2016-05*, 1.
- Goutier, J, Gigon, J., Burniaux, P., Dion, C., Talla Takam, F., Chartier-Montreuil, W., Bandyayera, D. (En Préparation) . Géologie De La Région Du Lac De La Corvette, Municipalité D'eeyou Istchee Baie-James. Ministère De L'énergie Et Des Ressources Naturelles, Québec.
- Goutier, J., Dion, C., David, J., y Dion, D. (1999a). Géologie de la région de la passe Shimusuminu et du lac Vion (33F/11 et 33F/12). *Ministère des Ressources naturelles, Québec, RG*, 98, 17.
- Goutier, J., Dion, C., Lafrance, I., David, J., Parent, M. y Dion, D. (1999b). Géologie de la région des lacs Langelier et Threefold. *Ministère des Ressources naturelles du Québec; RG 98-18*, 2, 54.
- Goutier, J., Dion, C., Lafrance, I., David, J., Parent, M., Dion, D., (1998g). Géologie de la région des lacs Langelier et Threefold (SNRC 33F/03 et 33F/04). *Ministère des Ressources naturelles du Québec, RG*, 99, 18.
- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M. C., David, J., Parent, M. (2000). Géologie de la région des lacs Guillaumat et Sakami (33F/002 et 33F/07): Géologie Québec. *Rapport Géologique*, 99-05.
- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M., Davis, D., David, J. y Parent, M. (2002). Géologie de la région du lac Guyer (33G/05, 33G/06 et 33G/11). *Ministère des Ressources naturelles du Québec; RG 2001-15*, 3, 55
- Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M., Mercier-Langevin, P., Davis, D. (2000). Géologie de la colline Masson, de la passe Awapakamich, de la Baie Carbillet et de la passe Pikwahipanan. *Ministère de Ressources naturelles et de la Faune. Rapport RG*, 10, 69.
- Goutier, J., Doucet, P., Dion, C., Beausoleil, C. y Dion, D. (1998b). Géologie de la région du lac Esprit (33F/05). *Ministère des Ressources naturelles, Québec; 98-09*, 39.



- Goutier, J., Doucet, P., Dion, C., Beausoleil, C., David, J., Parent, M., Dion, D., (1998i) - Géologie de la région du lac Kowskatehkakmow (33F/06). *Ministère des Ressources naturelles, Québec; RG, 98, 16.*
- Goutier, J., Doucet, R., Dion, C., Beausoleil, C. y Dion, D. (1998c) - Géologie de la région du lac Esprit (33F/ 05). *Ministère des Ressources naturelles du Québec, 98- 09, 39.*
- Goutier, J., Doucet, R., Dion, C., Beausoleil, C., David, J., Parent, M. y Dion, D. (1998a). Géologie de la région du lac Kowskatehkakmow (33F/06). *Ministère des Ressources naturelles, Québec; RG 98-16, 48.*
- Goutier, J., Ouellet, M., Dion, C., Houlé, M., Boily, M. (2003). Synthèse géologique de la région des lacs Sakami (33F) et Guyer (33G), Baie-James: *Ministère des Ressources naturelles, Québec, Report DV 2002-12, 11–13.*
- Groves, D., Goldfarb, R., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S., Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types, *Ore Geology Reviews, 13(1-5), 7–27.* [Doi:10.1016/S0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00012-7)
- Grunsky, E. y Smee, B. (1999). The differentiation of soil types and mineralization from multi-element geochemistry using multivariate methods and digital topography. *Journal of Geochemical Exploration, 67, 287–299.* [Doi: 10.1016/S0375-6742\(99\)00054-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(99)00054-0)
- Guérin, H. (2017). Rapport des travaux statutaires été 2016, propriété du lac Menarik. Baie-James, Québec, Canada. *Harfang Exploration Inc, SNRC 33F06, 164*
- Hagemann, S. y Cassidy, K. (2000). Archean orogenic lode gold deposits. In: Gold in 2000 (Hagemann, S.G. and Brown, P.E., editors). *Reviews in Economic Geology, 13, 9-68.*
- Hair, J., Babin, B., Black, W. y Anderson, R. (2009). *Multivariate Data Analysis* (7^{ma} ed.). New York, USA: Pearson Prentice Hall. 816.
- Hocq, M (1994). Géologie du Québec. *Ministère des Ressources naturelles, Québec, MM 94-01, 166.*
- Hodgson, C. (1993). Mesothermal lode-gold deposits. In: Mineral Deposit Modeling (Kirkham, R.D., Sinclair, W.D., Thorpe R.I. and Duke, J.M., editors). *Geological Association of Canada; Special Paper, 40, 635-678.*
- Hodgson, C. y MacGeehan, P. (1982) A review of the geological characteristics of 'gold-only' deposits in the Superior Province of the Canadian Shield. *Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, 24, 211-229.*
- Hodgson, C., Chapman, R. y MacGeehan, P. (1982) Application of exploration criteria for gold deposits in the Superior Province of the Canadian Shield to gold exploration in the Cordillera. In Precious Metals in the Northern Cordillera. Proceedings of a symposium held on April 13--15 1981 in Vancouver, British Columbia (ed. A. A. Levinson), 173-206.



- Houlé, M., Goutier, J., Sappin, A., McNicoll, V., (2015). Regional characterization of ultramafic to mafic intrusions in the La Grande Rivière and Eastmain domains, Superior Province, Québec. *Geological Survey of Canada*, 7856, 125–137.
- Houlé, M., LaFlèche, M., Hébert, R., Beaudoin, G., y Goutier, J (sf). PGE mineralization in the Archean Menarik Igneous Complex, James Bay, Québec, Canada.
- Howarth, R. (1983). *Handbook of exploration Geochemistry: Vol. 2. Statistics and Data Analysis in Geochemical Prospecting*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science. 417.
- Kaiser, H. (1958). The varimax criterion for analytical rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23, 187–200. [Doi: 10.1007/BF02289233](https://doi.org/10.1007/BF02289233)
- Khorasanipour, M., Tangestani, M. y Naseh, R. (2011). Application of multivariate statistical methods to indicate the origin and geochemical behavior of potentially hazardous elements in sediment around the Sarcheshmeh copper mine, SE Iran. *Environmental earth sciences*, 66, 589-605. [Doi: 10.1007/s12665-011-1267-6](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1267-6)
- Kissin, S. (1992) - Five element (Ni-Co-As-Ag-Bi) Veins. *Geoscience Canada*.19, 113-124.
- Kurinnaya, U., Lapukhov, A., Artamonova, S., Guzman, S. y Kolmogorov, Y. (2011). Application of SR XFA Data to Statistical Studies of Stable Geochemical Associations of the Asachinsky Au–Ag Deposit (Southern Kamchatka). *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 5, 1079–1084. [Doi: 10.1134/S1027451011110103](https://doi.org/10.1134/S1027451011110103)
- Kürzl, H. (1988). Exploratory data analysis: recent advances for the interpretation of geochemical data. *Journal of Geochemical Exploration*, 30, 309-322. [Doi: 10.1016/0375-6742\(88\)90066-0](https://doi.org/10.1016/0375-6742(88)90066-0)
- Larbi, Y., Stevenson, R., Breaks, F., Machado, N., and Gariépy, C. 1999. Age and isotopic compositions of late Archean leucogranites: implications for continental collision in the western Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36: 495–510.
- Larocque, M. (1999). *Les formations de fer aurifères archéennes des ceintures de roches vertes de La Grande Rivière et de la rivière Eastmain, Baie-James. Étude minéralogique et minéragraphique de cinq zones indicielles métamorphisées et/ ou métasomatisées* (Tesis de maestría). Université du Québec à Montréal, Quebec, Canadá, 235.
- Laverdier, G. (2020). Technical evaluation of the gold potential Eva Project, Jamesie, Nord-du Quebec, Quebec. *Vanstar Mining Resources*, 36.
- Leclerc, A. (2008). Contexte géologique régional du nord-est de la province du Supérieur. Dans: *Synthèse du nord-est de la Province du Supérieur. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec, MM 2008-02*, 8, 198.



- Legault, M. y Simard, P. (1998). Rapport des travaux de terrain, propriétés La Grande Sud et Lac Bonfait, volume 1 de 5 (rapport, plan 1 et 2). *Rapport statutaire déposé au ministère des Ressources naturelles, Québec*; GM 56208, 16, 149.
- Lepeltier, C. (1969). A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*, 64 (5), 538 – 550. Doi: 10.2113/gsecongeo.64.5.538
- Levinson, A. (1973). *Introduction to Exploration Geochemistry*. Illinois, USA: Applied Publishing Ltd. 614.
- Lin, X., Wang, X., Zhang, B., Yao, W. (2014). Multivariate analysis of regolith sediment geochemical data from the Jinwozi gold field, north-western China. *Journal of Geochemical Exploration*, 137, 48–54. Doi: [10.1016/j.gexplo.2013.11.006](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.11.006)
- Linares, J. (2013). *Generación de mapas geoquímicos para la prospección de depósitos minerales mediante el análisis de los elementos K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Rb, Y, Zr, Nb y Sr en la fracción fina de sedimentos de corriente de la cuenca del alto Paragua, Estado Bolívar, Venezuela* (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 139.
- Matschullat, J. Ottenstein, R. y Reimann, C. (2000). Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology*, 39, 990-1000. Doi: [10.1007/s002549900084](https://doi.org/10.1007/s002549900084)
- Maurice, C. (2008). Essaims de dykes mafiques du nord-est de la Province du Supérieur. Dans: Synthèse du nord-est de la Province du Supérieur. *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec*, MM 2008-02, 8,198.
- Mazzella, A. y Mazzella, A. (2013). The importance of the model choice for experimental semivariogram modeling and its consequence in evaluation process. *Journal of Engineering*, 2013, 1 – 10. Doi: [10.1155/2013/960105](https://doi.org/10.1155/2013/960105)
- McBratney, A. y R. Webster (1986). Choosing Functions for Semi-variograms of Soil Properties and Fitting Them to Sampling Estimates". *Journal of Soil Science*, 37,617–639. Doi: [10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x)
- Mercier-Langevin, P. (2000). *Les minéralisations aurifères au sein de la Tonalite de La-Grande-Sud, Baie-James, Québec* (Tesis de maestría) Université du Québec à Chicoutimi, Quebec, Canadá, 258.
- Mercier-Langevin, P., Daigneault, R., Goutier, J., Dion, C. y Archer, P. (2012). Geology of the Archean Intrusion-Hosted La-Grande-Sud Au-Cu Prospect, La Grande Subprovince, James Bay Region, Québec. *Economic Geology*; 107 (5), 935–962. Doi: [10.2113/econgeo.107.5.935](https://doi.org/10.2113/econgeo.107.5.935)
- Mills, J. (1967). Long Lake Map Area. *Ministère des Richesses naturelles, Québec*; DP-141, 1, 10.



- Ministerio de Energía y Recursos Naturales (MERN). Suite de granito del Vieux Comptoir. Léxico estratigráfico de Quebec. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-du-superieur/suite-granitique-du-vieux-comptoir> [citado el día mes año].
- Moon, C., Whateley, M. y Evans, A. (2006). *Introduction to mineral exploration* (2^{da} ed.). Oxford: Blackwell Publishing. 499.
- Moorhead, J., Bernier, L., Fallara, F., Goutier, J., y Laflèche, M., (2000). Caractéristiques des zones d'altération du secteur du lac Shipogan (33F/02 et 33F/03). *Ministère des Ressources naturelles, Québec, Report MB 2000- 07*, 132.
- Mrvić, V., Kostić-Kravljanić, L., Čakmak, D., Sikirić, B., Brebanović, B., Perović, V. y Nikoloski, M. (2011). Pedogeochemical mapping and background limit of trace elements in soils of Branicevo Province (Serbia). *Journal of Geochemical Exploration*, 109(1-3), 18–25. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2010.09.005](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.09.005)
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. (1^{ra} ed.). Mexico: McGraw-Hill Companies, Inc. 900.
- Navidi, W. (2010). *Statistics for Engineers and Scientists*. (3^a ed.). New York, United States: McGraw Hill. 933.
- Pais, I.; Benton, J. B. (1997). *The Handbook of Trace Elements*. CRC Press, Boca Raton, Florida
- Paquette, L. - Gauthier, M. (1997) - Séquences archéennes du lac Sakami, baie James. *Ministère des Ressources naturelles, Québec; MB 97-02*, 34.
- Peh, Z. Miko, S. y Hasan O. (2010). Geochemical background in soils: a linear process domain? An example from Istria (Croatia). *Environmental Earth Science*, 59, 1367- 1383. [Doi: 10.1007/s12665-009-0125-2](https://doi.org/10.1007/s12665-009-0125-2)
- Percival, J. y Card, K. (1994). Geology, Lac Minto — Rivière aux Feuilles. *Geological Survey of Canada; Map 1854A, scale 1: 500 000*.
- Percival, J., Skulski, T. y Card, K. (1995). Geology, Rivière Kogaluc — Lac Qalluviartuuq region (parts of 34J and 340). *Geological Survey of Canada; Open File 3112, scale 1: 250 000*
- Percival, J., Skulski, T. y Nadeau, L. (1996). Geology, Lac Couture, Quebec. *Geological Survey of Canada; Open File 3315, scale 1: 250 000*.
- Percival, J., Skulski, T. y Nadeau, L. (1997) Reconnaissance geology of the Pelican-Nantais belt, northeastern Superior Province, Quebec. *Geological Survey of Canada; Open File 3525, scale 1: 250 000*.
- Percival, J., Skulski, T., Sanborn-Barrie, M., Stott, G., Leclair, A., Corkery, M., Boily, M. (2012). Geology and tectonic evolution of the Superior Province, Canada. In *Tectonic styles in Canada: the LITHOPROBE. Geological Association of Canada St. Johns, NL, Canada*. 49. 321-378.



- Pitacairn, L., Peillod, A., Patten, C., Goutier, J. (2019). Metabasalts as sources of gold in Archean greenstone belts. *Conference: 15th Biennial SGA*, 5.
- Pitcairn I., Craw D, Teagle D. (2014). Metabasalts as sources of metals in orogenic gold deposits. *Mineralium Deposita*, 50(3), 373–390
- Pitcairn, I., Leventis, N., Beaudoin, G., Faure S., Dubé, B., (2017). A metasedimentary source of Au for the Abitibi? *15th Biennial SGA Conference*, 20-23rd August 2017, Quebec, Canada
- Portella, P. (1980). Les bassins sédimentaires protérozoïques du lac Tilly et de la rivière Laforge. Leur place dans l'agencement structural du territoire du Nouveau-Québec dégagé par photographies de satellites et cartes aéromagnétiques. Université scientifique et médicale de Grenoble, France; thèse de doctorat de spécialité (géologie appliquée), 197.
- Quino, C. (2017). *Exploración geoquímica y determinación de elementos pathfinder - target proyecto: achanizo chaparra – caravelí arequipa* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. 111.
- Reedman, J. (1979). *Techniques in Mineral Exploration*. London, United Kingdom: Applied Science Publishers Ltd. 534.
- Reimann, C. y Filzmoser, P., (2000). Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 39, 1001–1014. [Doi.org/10.1007/s002549900081](https://doi.org/10.1007/s002549900081)
- Reimann, C. y Garrett, R. G. (2005). Geochemical background—concept and reality. *Science of The Total Environment*, 350(1-3), 12–2. [Doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.01.047](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.047)
- Richer-Lafèche, M., Moorhead, J., Goutier, J. y Fallara, F. (2000). Géochimie des roches volcaniques et des formations de fer du Groupe de Yasinski, sous-province de La Grande: *Ministère des Ressources naturelles, Québec, Report MB 2000-13*, 67.
- Rigol, J. (2000). *Aplicación de sistemas de información geográfica y teledetección en exploración minera* (Tesis doctoral). Universidad de Granada, Granada, España, 435.
- Rivard, B. y Francis, D. (1984). Preliminary models for basalt evolution in the La Grande greenstone belt. In: Chibougamau. Stratigraphy and Mineralization (J. Guha et E.H. Chown, éditeurs). *Institut canadien des Mines et de la Métallurgie; volume spécial 34*, 48-56.
- Robert, F., Poulsen, K., Cassidy, K., y Hodgson, C. (2005). Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons. *Economic geology*, 100, 1001-1033. [Doi: 10.5382/AV100.30](https://doi.org/10.5382/AV100.30)
- Robert, F., Poulsen, K., Dubé, B., y Gubins, A. (1997). Gold deposits and their geological classification. *Proceedings of exploration 97*, 209-220.



- Rodríguez, C. (2012). *Análisis espacial geológico-minero para la definición de áreas de interés prospectivo en los municipios de Actopan y Pachuca, estado de Hidalgo, México* (Tesis de maestría). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile. 166.
- Roscoe, S. y Donaldson, J. (1988). Uraniferous pyritic quartz pebble conglomerate and layered ultramafic intrusions in a sequence of quartzite, carbonate, iron formation and basalt of probable Archean age at Lac Sakami, Quebec. *Current Research, Part C. Geological Survey of Canada*, 88-IC, 117-121.
- Rowan, L., Hook, S., Abrams, M. y Mars, J. (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, 98(5), 1019-1027. [Doi:10.2113/gsecongeo.98.5.1019](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.5.1019)
- Sánchez, A. (2012). *Análisis de componentes principales: versiones dispersas y robustas al ruido impulsivo* (Tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España. 130.
- Sigeom, (10 de agosto de 2018). *Sous-provinces d'Opinaca*, Recuperado octubre 2020 de <https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-du-superieur/sous-province-opinaca/>
- Sillitoe, R. (2000). Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Reviews in Economic Geology*, 13, 315-345. [Doi: 10.5382/Rev.13.09](https://doi.org/10.5382/Rev.13.09)
- Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105 (1), 3-41. [Doi: 10.2113/gsecongeo.105.1.3](https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3)
- Simard, M. (2008). Lexique stratigraphique des unités archéennes du nord-est de la Province du Supérieur. *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec*, DV 2008-03, 107.
- Simard, M. y Lafrance, I. (2011). Géologie de la région du lac Kinglet (SNRC 33J-33K01 et 33K02). *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec*. RG 2011-05, 1, 47.
- Simard, M., Lafrance, I. (2011). Geología De La Región Del Lago Kinglet. *MRNF; RG 2011-05, P47, 1 Plano*.
- Simard, P. (1999). Propriétés La Grande Sud (SNRC 33F/07, 33F/09, 33F/10); Rapport des travaux de terrain (12 juillet au 15 octobre 1999). Cambior inc. Et Mines d'Or Virginia inc. *Rapport statutaire soumis au Ministère des Ressources naturelles, Québec; GM 57561*, 10, 258.
- Sinclair, J. (1974). Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration*, 3(2), 129-149. [Doi:10.1016/0375-6742\(74\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(74)90030-2)
- Skulski, T., Hynes, A., Francis, D. (1984). Stratigraphie and lithogeochemical characterization of cyclic volcanism in the LG-3 area, La Grande River greenstone belt, Quebec.



- Chibougamau-Stratigraphy and Mineralization* (Guha, J. and Chown, E.H., editors), 34, 7-72.
- Smith, S., Foster, G., Romer, R., Tindle, A., Kelley, S., Noble, S., Horstwood, M., and Breaks, F. (2004) U-Pb columbite-tantalite chronology of rare-element pegmatites using TIMS and Laser Ablation-Multi Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147, 549–564.
- Sobott, R. (1993). Environmental aspects of Thallium. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 166, 77-81.
- St. Seymour, K., Kumarapeli, S. y Vlassopoulos, D. (1988). Petrotectonics of Archean Yasinski metabasalts, Superior Province, Canada: implications for genesis of Archean greenstone belts. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*; 177, 165-183.
- Sun, X., Deng, J., Gong, Q. Wang, Q. Yang, L. y Zhao, Z. (2009). Kohonen neural network and factor analysis-based approach to geochemical data pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*. 103 (1), 6-16. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2009.04.002](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.04.002)
- Sun, X., Zheng, Y., Wang, C., Zhao, Z. y Geng, X. (2016). Identifying geochemical anomalies associated with Sb–Au–Pb–Zn–Ag mineralization in North Himalaya, southern Tibet. *Ore Geology Reviews*, 73, 1–12. [Doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.020](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.10.020)
- Thió-Henestrosa, S. y Martín-Fernández, J. (2006). Detailed guide to CoDaPack: a freeware compositional software. En: Buccianti, A., Mateu-Figueras, G., Pawlowsky-Glahn, V. (Eds.), *Compositional Data Analysis in the Geosciences: From Theory to Practice*, *Geological Society, London*, 264, 101–118 (Special Publications).
- Thió-Henestrosa, S. y Martín-Fernández, J. (2016). CoDaPack v1 user's guide.
- Thió-Henestrosa, S., Martín-Fernández, J. (2005). Dealing with Compositional Data: The Freeware CoDaPack. *Mathematical Geology*, 37, 773-793. [Doi: 10.1007/s11004-005-7379-3](https://doi.org/10.1007/s11004-005-7379-3).
- Titley, S. (1994). Evolutionary habits of hydrothermal and supergene alteration in intrusion-centered ore systems, southwestern North America. *Geological Association of Canada-Mineralogical Association of Canada Short Course Notes*, 11, 237–260.
- Tripathi, V. (1979). Factor analysis in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 11(3), 263–275. [Doi:10.1016/0375-6742\(79\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0375-6742(79)90004-9)
- Valls, R. (2008). *Why, and how, we should use compositional data analysis a Step-by-Step Guide for the Field Geologists*. Toronto: Wikibooks, 58. [Doi: 10.13140/2.1.1842.8482](https://doi.org/10.13140/2.1.1842.8482).
- Valls, R. (2017). *Exploring geological data with Weka, CoDaPack, and iNZight: graphical instructions*. Createspace Independent Publishing Platform, 104.



- Valls, R. (2021). El uso de cuartiles para la representación gráfica de datos geoquímicos. [Doi:10.17605/OSF.IO/745B8](https://doi.org/10.17605/OSF.IO/745B8)
- Valls, R., (2016). *Why and How Should Geologists Use Compositional data Analysis, a step-by-step guide for field geologists*. (1^{ra} ed). Toronto: Wikibooks, 46. [Doi: 10.17605/OSF.IO/TVK67](https://doi.org/10.17605/OSF.IO/TVK67)
- Veillette, J. (1995). New evidence for northwestward glacial ice flow, James Bay region, Quebec. En: *Current Research, Part C. Geological Survey of Canada; 95-IC*, 249-258.
- Wahba, G. (1990). Spline models for observational data. Society for industrial and applied mathematics. Winsconsin: Society for Industrial and applied mathematics, 180. [Doi:10.1137/1.9781611970128](https://doi.org/10.1137/1.9781611970128)
- Wang, J., Zuo, R. y Caers, J. (2017). Discovering geochemical patterns by factor-based cluster analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 181, 106–115. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2017.07.006](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.006)
- Wang, W., Zhao, J. y Cheng, Q. (2014). Mapping of Fe mineralization-associated geochemical signatures using logratio transformed stream sediment geochemical data in eastern Tianshan, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 141, 6–14. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2013.11.008](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.11.008)
- Ward, J. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function, *Journal of the American Statistical Association*, 58, 236–244.
- Webber A., Roberts, S., Taylor R., Pitcairn I. (2013). Golden plumes: Substantial gold enrichment of oceanic crust during ridge-plume interaction. *Geology*, 41 (1), 87–90 [Doi: https://doi.org/10.1130/G33301.1](https://doi.org/10.1130/G33301.1)
- Webster, R. y Oliver, M. (2007). *Geoestadística para científicos ambientales* (2^{da} ed.). Great Britain, United Kingdom: John Wiley & Sons, 330.
- Whalen, J., Percival, J., McNicoll, V., Longstaffe, F. (2004a) Geochemical and isotopic (Nd-O) evidence bearing on the origin of late- to post-orogenic high-K granitoid rocks in the Western Superior Province: Implications for late Archean tectonomagmatic processes. *Precambrian Research*, 132. 303–326.
- Wodicka, N., Lamothe, D. y Leclair, A. (2009). Géochronologie U-Pb du Projet Ashuanipi. *Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec*, 2009-03, 21.
- Wu, R., Chen, J., Zhao, J., Chen, J. y Chen, S. (2020). Identifying Geochemical Anomalies Associated with Gold Mineralization Using Factor Analysis and Spectrum Area Multifractal Model in Laowan District, Qinling-Dabie Metallogenic Belt, Central China. *Minerals*, 10(3), 229. [Doi:10.3390/min10030229](https://doi.org/10.3390/min10030229)
- Xiao, F., Chen, J., Zhang, Z., Wang, C., Wu, G. y Agterberg, F. (2012). Singularity mapping and spatially weighted principal component analysis to identify geochemical anomalies



- associated with Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 122, 90–100. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2012.04.010](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.010)
- Zhou, S., Zhou, K., Wang, J., Yang, G. y Wang, S. (2018). Application of cluster analysis to geochemical compositional data for identifying ore-related geochemical anomalies. *Frontiers of Earth Science*, 12, 491–505. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2012.04.010](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.010)
- Zuo, R. (2011). Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb–Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum–area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China). *Journal of Geochemical Exploration*, 111, 13–22. [Doi: 10.1016/j.gexplo.2011.06.012](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.06.012)
- Zuo, R., Xia, Q. y Wang, H. (2013). Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization. *Applied Geochemistry*, 28, 202–211. [Doi: 10.1016/j.apgeochem.2012.10.031](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.031)