

Copyright © 2019 Ricardo A. Valls

Todos los derechos reservados. Esta publicación está protegida por derechos de autor y el permiso debe obtenerse de Valls Geoconsultant antes de cualquier reproducción prohibida, almacenamiento en un sistema de recuperación, o transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopiado, grabación, o de la misma manera. Para obtener información sobre el permiso, escriba a Valls Geoconsultant al 1008-299 Glenlake Ave., Toronto, Ontario, Canadá, correo electrónico: vallsvg@gmail.com.

ISBN: 978-1688206618

CONTENIDO

Y

Clasificaciones geoquímicas conocidas.....	iv
Tabla Periódica de los Elementos.....	iv
Clasificación Geosférica.....	v
Clasificación “Magmatogénica”.....	vi
Clasificación Químico-Radiogénica.....	viii
Clasificación de A. N. Zavaritsky.....	viii
Clasificación de E. Sadetsky-Kordoch.....	ix
Clasificaciones de laboratorios.....	x
Algunos señalamientos generales.....	12
Nueva Clasificación Geoquímica “Unificada”.....	12
Clasificación “electrono-orbital” de los elementos.....	12
Conclusiones.....	17
Listado de Referencias.....	18
ACERCA DEL AUTOR.....	19

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Tabla periódica de los elementos diseñada por D. I. Mendeléiev en el año 1869.....	v
Figura 2. Tabla periódica de los elementos según D. I. Mendeléiev.....	v
Figura 3. Clasificación de Goldschmidt.....	vi
Figura 4. Relaciones entre elementos análogos según Zavaritsky.....	ix
Figura 5. Métodos de análisis preferidos para cada elemento.....	x
Figura 6. Resultados de los análisis enzimáticos reportados por ACT Labs.....	xi

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

Figura 7. Configuración electrónica del átomo.....13

Figura 8. Ejemplos de isótopos naturales.....13

Figura 9. Clasificación electróno-orbital de los elementos.....16

El objetivo de este trabajo es la confección de una nueva clasificación geoquímica de los elementos que elimine las divergencias que existen entre las clasificaciones conocidas y que sea, al mismo tiempo, de utilidad práctica para el geólogo de campo.

Como resultado, se obtuvo una clasificación geoquímica “unificada”, al reflejarse en la misma las clasificaciones preexistentes y la que se propone en este trabajo.

CLASIFICACIONES GEOQUÍMICAS CONOCIDAS

Las clasificaciones geoquímicas de los elementos tienen para el geólogo en general, y para el geoquímico en particular, no sólo importancia teórica, sino práctica.

En la actualidad se conocen más de diez sistemas de clasificación de los elementos de acuerdo a sus peculiaridades geoquímicas. A continuación detallaré las más importantes de las mismas.

Tabla Periódica de los Elementos

Realmente fue esta tabla confeccionada por el sabio Ruso D. I. Mendeléiev en el año 1869 (Fig. 1) el primer -ya al mismo tiempo exitoso- intento de clasificación de los elementos. En la misma los átomos se dividieron en grupos y períodos de acuerdo con sus propiedades químicas.

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

Reihen	Gruppe I. — R ⁰	Gruppe II. — R ⁰	Gruppe III. — R ⁰ ³	Gruppe IV. RH ⁴ R ⁰ ⁴	Gruppe V. RH ⁵ R ⁰ ⁵	Gruppe VI. RH ⁶ R ⁰ ⁶	Gruppe VII. RH ⁷ R ⁰ ⁷	Gruppe VIII. — R ⁰ ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	So=78	Br=80	
6	Rb=86	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Su=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Co=140				
9	(—)							
10			?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184		Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208			
12				Th=231		U=240		

Figura 1. Tabla periódica de los elementos diseñada por D. I. Mendeléiev en el año 1869.

La tabla periódica de Mendeléiev (Fig. 2) sirve de base a la gran mayoría de las clasificaciones geoquímicas propuestas posteriormente.

Periodic Table of the Elements

Figura 2. Tabla periódica de los elementos según D. I. Mendeléiev.

Clasificación Geosférica

Condicionalmente llamo así a la clasificación propuesta en el año 1932 por el geoquímico Inglés V. M. Goldschmidt (Goldschmidt, 1937). De acuerdo con la misma, todos los elementos en la tabla periódica se dividen en cuatro grupos geoquímicos de acuerdo a como se dividen los elementos durante la fundición de una roca condrítica en las cuatro facies (Fig. 3).

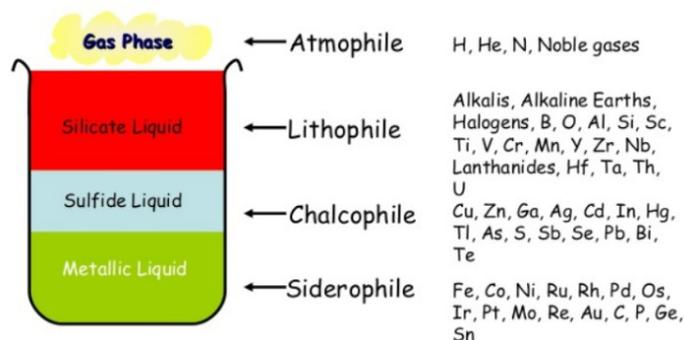


Figura 3. Clasificación de Goldschmidt.

Teniendo en cuenta que los grupos así obtenidos son característicos para geosferas específicas -de ahí el nombre propuesto para esta clasificación- Goldschmidt distinguió los grupos siguientes:

- a. Elementos atmosfílicos: H, He, N, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn.
- b. Elementos calcófilicos (oxifílicos): S, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, TL, Pb, Bi, (Po?).
- c. Elementos siderofílicos: Fe, Co, Ni, Mo, Te, Ru, Rh, Os, Ir, Pt, P?.
- d. Elementos litofílicos: Li, Be, B, C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, (S), Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, I, Cs, Ba, TR, Hf, Ta, W, Ra, Ac, etc.

Clasificación “Magmatogénica”

A partir de la tabla periódica de Mendeléiev, diversos investigadores trataron de confeccionar una clasificación geoquímica que explicara el comportamiento de los elementos en los procesos naturales, así como los enlaces y asociaciones paragenéticas de los mismos, teniendo en cuenta sus respectivas posiciones en la tabla periódica.

Un ejemplo exitoso de este empeño fue la tabla propuesta en el año 1933 por A. E. Fersman (Fersman, n.d.). Fersman agrupó los elementos que aparecían concentrados en los diferentes tipos de rocas magmáticas, de ahí el nombre propuesto para esta clasificación. Fersman distinguió también cuatro tipos de elementos:

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

1. Elementos de magmas ácidos.
2. Elementos de yacimientos sulfurosos.
3. Elementos de magmas máficos.
4. Elementos de magma ultramáficos.

Tanto la clasificación de Fersman como la de Goldschmidt, permiten conocer *a priori* cuales elementos se encontrarán en tal geosfera o complejo magmático y por ende, cuáles yacimientos son factibles de ser encontrados en la región estudiada.

Clasificación Químico-Radiogénica

Con este nombre se identificó la clasificación propuesta por V. I. Vernadsky en el año 1934 (V. I. Vernadsky, n.d.). Los principios en que se basó para su clasificación fueron los siguientes:

- a. Presencia o no en los elementos de propiedades radioactivas.
- b. Carácter regresivo o no de los procesos químicos y radioquímicos en los que toman parte los elementos.
- c. Existencia o no en la historia de dicho elemento en la corteza terrestre, de enlaces químicos o moléculas, compuesta por varios átomos.

De acuerdo con dichos criterios, V. I. Vernadsky dividió los elementos en seis grupos:

1. Gases inertes (5): He, Ne, Ar, Kr, Xe.
2. Metales nobles (7): Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au.
3. Elementos cíclicos (44): H, Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge(?), As, Se, Sr, Zr (?), Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Ba, Hf, W, Re, Hg, Tl, Pb, Bi.
4. Elementos dispersos (11): Li, Sc, Ga, Br, Rb, Y, Nb, In, I, Cs, Ta.
5. Elementos fuertemente radioactivos (7): Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U.
6. Elementos de las Tierras Raras (15): La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tu, Yb.

Clasificación de A. N. Zavaritsky

Esta clasificación fue propuesta en el año 1944. La misma se basa también en la forma primaria ampliada de la tabla periódica, aunque algo diferente a la empleada por Fersman.

Zavaritsky (Zavaritsky., 1961; Zavaritsky, 1950) dividió la tabla periódica en 10 bloques los cuales unen a los elementos químicamente análogos entre si (Fig. 4).

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

G P	GFE			Synthetic Geological Section	T
	4	5	6		
IIIB	Zn	(Cd)	Hg	Hg	L ↑ ↓ H
IB	Cu	Ag	Au	Cu Ag Au	
VIIIB -VIII	Magma Field	(Tc)	Pt	Mo W	
VIB		Mo	W	Ta	
VB		Nb	Ta	Nb	
IVB		Zr	Hf	(Zr, Hf)	
IIIB	Y	La	REE		

Figura 4. Relaciones entre elementos análogos según Zavaritsky.

Zavaritsky definió los siguientes grupos:

- Gases inertes (del He al Rn).
- Elementos petrogénicos (Na, Mg, etc.).
- Elementos de las emanaciones magmáticas (B?, F, etc.).
- Elementos del grupo del hierro (Ti, V, Fe, etc.).
- Elementos raros (Sc, TR, etc.).
- Elementos radioactivos (Ra, U, etc.).
- Elementos meníferos metálicos (Cu, Zn, etc.).
- Elementos metaloides (As, Sb, etc.).
- Elementos del grupo del platino (Os, Ir, Pt, etc.).
- Elementos pesados (Br, etc.).

Según la opinión de Saukov y otros autores (Saukov, 1951) esta clasificación es más lógica que las discutidas anteriormente. No obstante su aplicación práctica es, a mi entender, menos efectiva que las clasificaciones propuestas por Fersman o Goldschmidt.

Clasificación de E. Sadetsky-Kordoch

La clasificación de este investigador húngaro fue propuesta en el año 1952. La misma es un detalle de la clasificación de Goldschmidt, en la cual agrupó los elementos en siete grupos, en lugar de cuatro.

- Elementos siderofílicos: Au, Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt.
- Elementos sulfo-calcofílicos: Cu, Ag, Zn(?), Cd (?), Hg, As, Sb, S, Se, Te, P(?).

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

3. Elementos oxi-calcofílicos: Ge, Sn, Pb, Ga, In, Tl, Zn(?), Cd (?), P(?).
4. Elementos litofílicos: Li (?), Na, K, Rb, Cs, Be (?), Mg, Ca, Sr, Ba, Al, Si.
5. Elementos pegmatofílicos: Ar, Kr, Xe, Rn. licos: Ti, V, Zr, Mn, Sc, Y, La-Lu, Th, U, Hf (?), Nb, Ta, W, Mo.
6. Elementos sedimentofílicos: B, C, N, F, Cl, Br (?), I (?).
7. Elementos atmofílicos: H (?), N (?), He, Ar, Kr, Xe, Rn.

A pesar de ser esta clasificación más detallada que la propuesta por Goldschmidt, en la misma existen varios elementos acompañados por signos de interrogación. Es de señalar que E. Sadetsky-Kordoch es uno de los primeros en considerar el oro como elemento siderofílico y no calcofílico.

Clasificaciones de laboratorios

Existen otras clasificaciones más orientadas a la parte práctica de los análisis o a la forma en que se presentan los resultados.

Por ejemplo, la Fig. 5 muestra una tabla periódica usada por ALS Minerals que muestra los métodos de análisis preferidos para cada elemento.

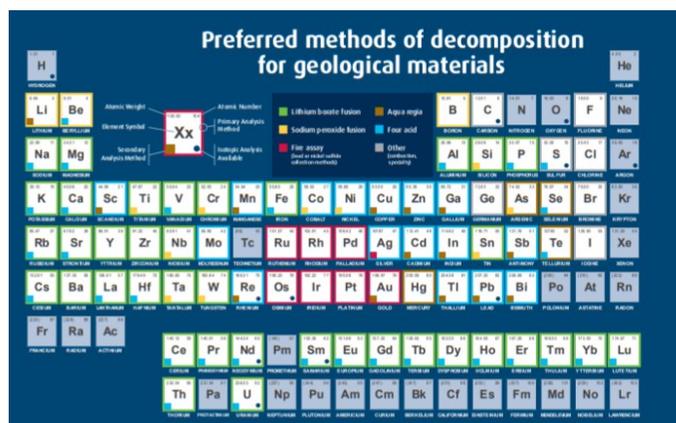


Figura 5. Métodos de análisis preferidos para cada elemento.

Otro laboratorio canadiense, ACT Labs reporta los resultados de sus análisis parciales enzimáticos agrupando los elementos en tipos de mineralización, tal como se muestra en la Fig. 6.

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

Oxidation Suite		Element		Detection Limit (ppb)	
Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)
S, Q, Cl	2,000	Se	5	Re	0.01
Br	5	Mo	1	Au	0.05
I	2	Sb	0.1	S, Q, Hg	1
V	1	Te	1	Th	0.1
As	1	W	1	U	0.1

Base Metals		Element		Detection Limit (ppb)	
Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)
Co	1	Ru	1	Pd	1
Ni	3	Pt	1	Os	1
Cu	3				
Zn	10				
Pb	1				

Base Metals: Chalcophile Associated Indicators		Element		Detection Limit (ppb)	
Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)
Ga	1	In	0.1	Rb	1
Ge	0.5	Sn	0.8	Sr	1
Ag	0.2	Tl	0.1	Cs	0.1
Cd	0.2	Pb	0.8	Ba	1

High Field Strength Elements		Element		Detection Limit (ppb)	
Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)
S, Q, Ti	100				
S, Q, Cr	20				
Y	0.5				
Zr	1				
Nb	1				
Hf	0.1				
Ta	0.1				

Rare Earth Elements		Element		Detection Limit (ppb)	
Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)
La	0.1	Tb	0.1		
Ce	0.1	Dy	0.1		
Pr	0.1	Ho	0.1		
Nd	0.1	Er	0.1		
Sm	0.1	Tm	0.1		
Eu	0.1	Yb	0.1		
Gd	0.1	Lu	0.1		

Platinum Group Elements		Element		Detection Limit (ppb)	
Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)
Ru	1				
Pd	1				
Os	1				
Pt	1				

Lithophile Elements		Element		Detection Limit (ppb)	
Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)	Element	Detection Limit (ppb)
S, Q, Li	2	Rb	1		
Be	2	Sr	1		
S, Q, Sc	100	Cs	0.1		
Mn	1	Ba	1		

Code 7 MAJ		Element		Detection Limit (ppm)	
Element	Detection Limit (ppm)	Element	Detection Limit (ppm)	Element	Detection Limit (ppm)
Fe	1				
Ca	5				
Na	5				
Mg	2				
K	5				
S	10				
Al	0.5				
P	1				

Figura 6. Resultados de los análisis enzimáticos reportados por ACT Labs.

Algunos señalamientos generales

Cada una de las clasificaciones presentadas tienen sus ventajas y limitaciones para su aplicación. A continuación detallaremos algunas de estas.

A pesar de ser la tabla periódica de Mendeléiev la base para la confección de la gran mayoría de los sistemas de clasificación existentes, la misma no puede emplearse como una clasificación puramente geoquímica.

El sistema propuesto por Goldschmidt es esquemático y por ello es menos empleable en la práctica que el propuesto por Fersman, a pesar de que esta última se limita a tres tipos de rocas magmáticas.

Aún teniendo en cuenta esa limitante, considero la clasificación de Fersman más útil en la práctica de los trabajos geológicos de búsqueda y exploración, que los sistemas propuestos por V. I. Verdandsky y A. N. Zavaritsky.

NUEVA CLASIFICACIÓN GEOQUÍMICA “UNIFICADA”

Clasificación “electrono-orbital” de los elementos

El sistema de clasificación geoquímica que se propone en este libro tiene su base, al igual que la mayoría de los sistemas existentes, en la tabla periódica del insigne sabio ruso D. I. Mendeléiev.

Como es conocido, la conducta de los elementos en los procesos naturales, sus características químicas, sus propiedades migratorias, sus asociaciones paragenéticas, sus enlaces químicos, sus concentraciones en determinadas geosferas o rocas magmáticas, la abundancia o escasez de los mismos en el universo, y -de forma indirecta- hasta las propiedades físicas de dichos elementos dependen principalmente de la estructura de los últimos niveles orbitales de los átomos de dicho elemento así como de las condiciones termodinámicas de los procesos que intervengan en los mismos.

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

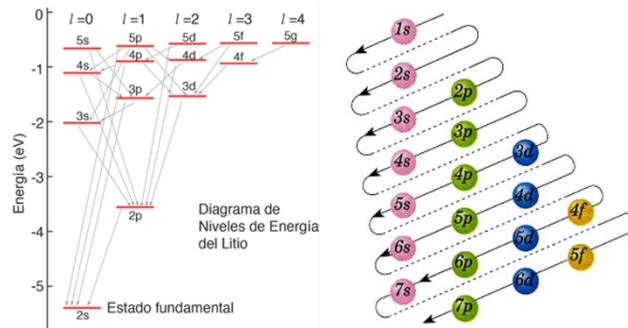


Figura 7. Configuración electrónica del átomo.

Las semejanzas en las estructuras de los niveles orbitales explican las similares propiedades químicas y físicas y la presencia conjunta de dichos elementos en la naturaleza formando diversos grupos, por ejemplo, el grupo del hierro, de los platinoides, de las Tierras Raras, etc.

Si los niveles electrónicos de un grupo de átomos están conformados de forma idéntica, es de esperar que sus propiedades químicas y físicas sean semejantes. Una confirmación indirecta de lo planteado es el hecho que los isótopos de un elemento no pueden ser identificados o separados por medios químicos.

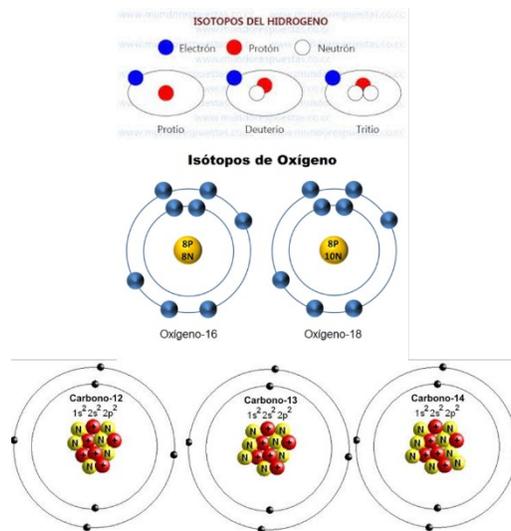


Figura 8. Ejemplos de isótopos naturales.

De lo anteriormente expuesto se deriva que el principio fundamental de esta clasificación geoquímica es la estructura de los orbitales electrónicos exteriores de cada elemento. De acuerdo con este principio se obtienen 18 grupos de elementos: 1S, 2S, 2P, 3S, 3P, 4S, 3D, 4P, 5S, 4D, 5P, 6S, 4F, 5P, 6P, 7S, 5F, Y 6D.

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

Estos índices están compuestos por una letra, la cual representa el nivel orbital donde se encuentran los electrones más externos, y de una cifra, la cual representa el nivel de energía de dicho orbital. Esta claro que todos los elementos de un grupo determinado se comportarán de forma análoga.

Para la confección de esta clasificación empleé la tabla periódica aunque con algunas variaciones. La diferencia principal radica en la separación de los elementos de transición del 4^{to}, 5^{to}, y 6^{to} nivel en una sección aparte de la tabla. Así, de una forma natural, se obtuvo la clasificación “geoesférica” En los extremos superior y derecho de la parte izquierda de la tabla, se agrupan los elementos atmosféricos. El área restante la ocupan los elementos calcofílicos. En la parte superior derecha de la tabla se localizan los elementos litofílicos. Por último, en la parte inferior derecha de la tabla se agrupan los elementos siderofílicos.

De acuerdo con el principio empleado por Fersman, se destacaron aquellos elementos que se encuentran en determinados tipos de rocas magmáticas (clasificación Magmatogénica). De esta forma se obtuvieron seis grupos:

1. Elementos de magmas ultramáficos
2. Elementos de magmas máficos.
3. Elementos de magmas félsicos.
4. Elementos de yacimientos sulfurosos.
5. Elementos poligenéticos.
6. Elementos de génesis desconocida.

Es de destacar que la división anterior se realizó en base a los datos que reunió A. P. Vinogradov en el año 1962 (citado en Ermakov, 2017), o sea posterior a la clasificación de Fersman. No obstante, con pequeñas excepciones, los resultados fueron similares.

Señalaré, por último, que tanto la clasificación de Vernadsky, como la de Zavaritsky, se encuentran reflejadas de forma natural en la tabla propuesta (Fig. 9), lo cual remarca el carácter “unificado” de la misma.

Nueva clasificación geoquímica de los elementos.

Electro-orbital geochemical classification of elements

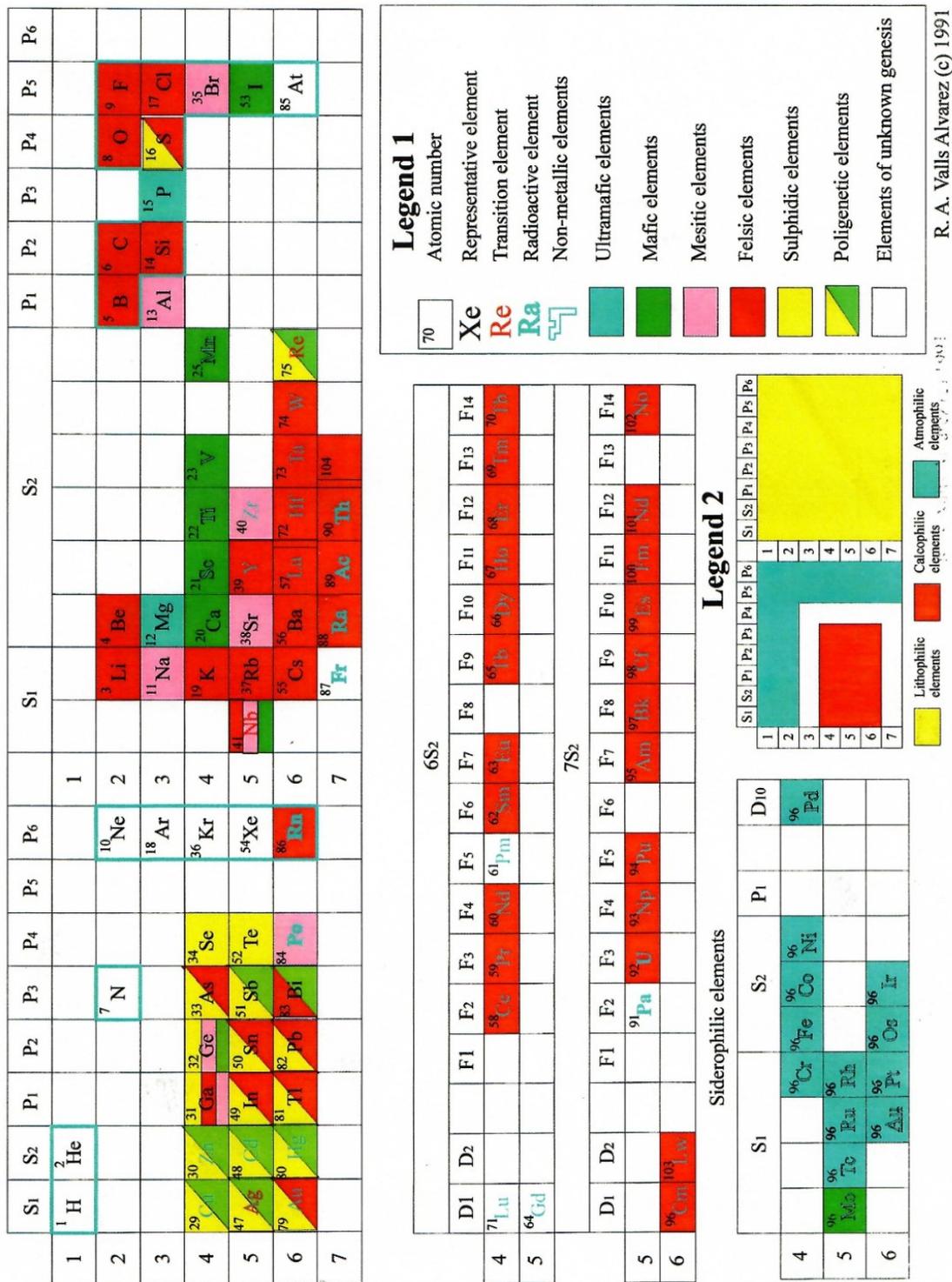


Figura 9. Clasificación electrono-orbital de los elementos.

CONCLUSIONES

La clasificación propuesta en la Fig. 9 presenta no sólo interés teórico, sino también práctico. En la misma se reflejan las principales clasificaciones geoquímicas de forma unificada, más la que se propone en este estudio. El principio de clasificación de la misma -la estructura de los niveles electrónicos exteriores- es universal, siendo esta una de las mayores ventajas de la clasificación.

En lo que respecta a la génesis de los yacimientos, es necesario señalar que no tomé en cuenta el parcial origen orgánico de algunos gases, ni el origen sedimentario de algunos elementos, ya que esto conllevaría a una saturación de la imagen perdiéndose de esa forma una de sus ventajas fundamentales, la sencillez y la “visibilidad” de la misma.

El sistema propuesto permite determinar el comportamiento químico de los elementos, sus asociaciones paragenéticas, etc., en dependencia del tipo de nivel orbital electrónico.

LISTADO DE REFERENCIAS

- Ermakov, V. V., 2017. A.P. Vinogradov's concept of biogeochemical provinces and its development. *Geochemistry Int.* 55, 872-886. <https://doi.org/10.1134/S0016702917100044>
- Fersman, A.E., n.d. *Geochemistry for Everyone: Alexander E. Fersman*: Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive.
- Goldschmidt, V.M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society on March 17th, 1937. *J. Chem. Soc.* 0, 655-673. <https://doi.org/10.1039/JR9370000655>
- Saukov, A. A., 1951. *Geohimiya* [WWW Document]. Verlag Tech. URL <https://www.amazon.com/Saukov-Geohimiya-AA/dp/B071143K9W> (accessed 9.1.19).
- V. I. Vernadsky, n.d. *The Biosphere - Vladimir I. Vernadsky* - Google Books. Springer-Verlag, New York.
- Zavaritsky, A.N., 1950. Introduction to petrochemistry of igneous rocks. *Acad. Sci. USSR, Moscow-Leningr.* 399.
- Zavaritsky, A.N., 1961. *Vdenie v petrojimiu izveershenij gornij porode*. AN SSSR, Moscow.

ACERCA DEL AUTOR



Como geólogo profesional con treinta y seis años en la industria minera, tengo una amplia experiencia geológica, geoquímica y minera, habilidades gerenciales y una sólida experiencia en técnicas de investigación y capacitación de personal técnico. Hablo inglés, francés, español y ruso con fluidez. He participado en diversos proyectos en todo el mundo (Canadá, Africa, Rusia, Indonesia, el Caribe y América Central y del Sur). Proyectos incluidos desde el reconocimiento regional hasta la cartografía local, los programas de perforación de diamantes y perforación de RC, la cartografía y muestreo subterráneo y a cielo abierto, el muestreo e interpretación geoquímicos, y varias técnicas de exploración relacionadas con la búsqueda para diamantes, PGM, oro, níquel, plata, metales base, minerales industriales, petróleo y gas, y otros depósitos de mineral magmático, hidrotérmico, porfirítico, VMS y SEDEX. Las fortalezas especiales están relacionadas con la adquisición de nuevas propiedades, estudios geoquímicos y geológicos, gestión y organización, análisis y modelado geomatemático, análisis de datos compositivos, estudios estructurales, diseño de bases de datos, estudios de control de calidad, estudios de exploración y la redacción de informes técnicos. P.Geo. registrado en la provincia de Ontario.

