



Petrología Ígnea y metamórfica

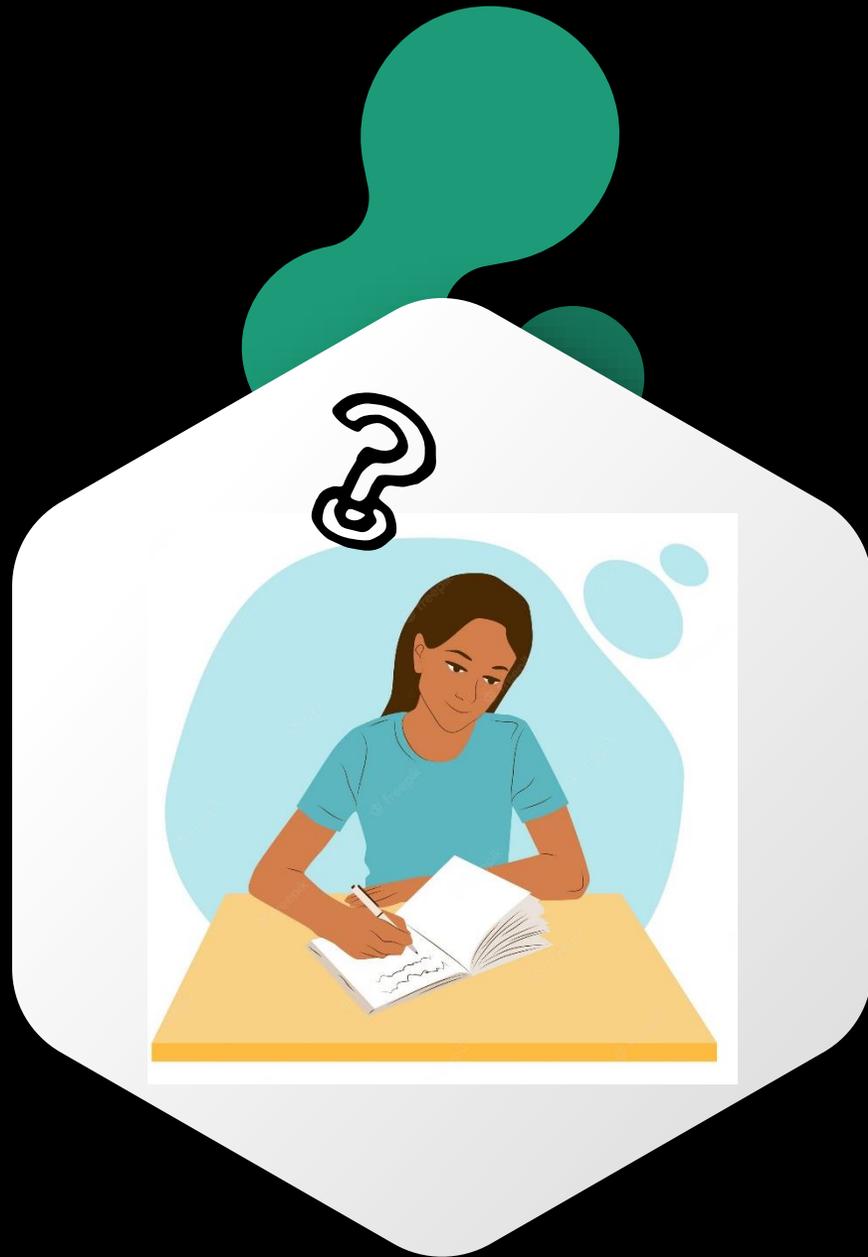
2024





TEMAS

* Composición y clasificación
de las rocas ígneas



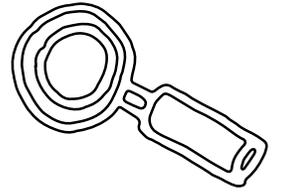
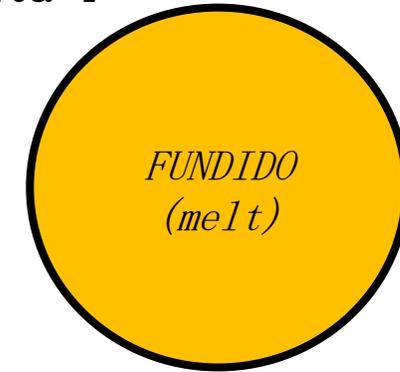
- I. ¿Cómo reconocemos a una roca ígnea?
- II. ¿Cómo está compuesta una roca ígnea?
- III. ¿Qué métodos empleamos para conocer la composición de una roca ígnea?
- IV. ¿Para qué clasificar una roca ígnea?
- V. ¿Qué criterios se utilizan para clasificar una roca ígnea?
- VI. ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de las diferentes formas de clasificar?



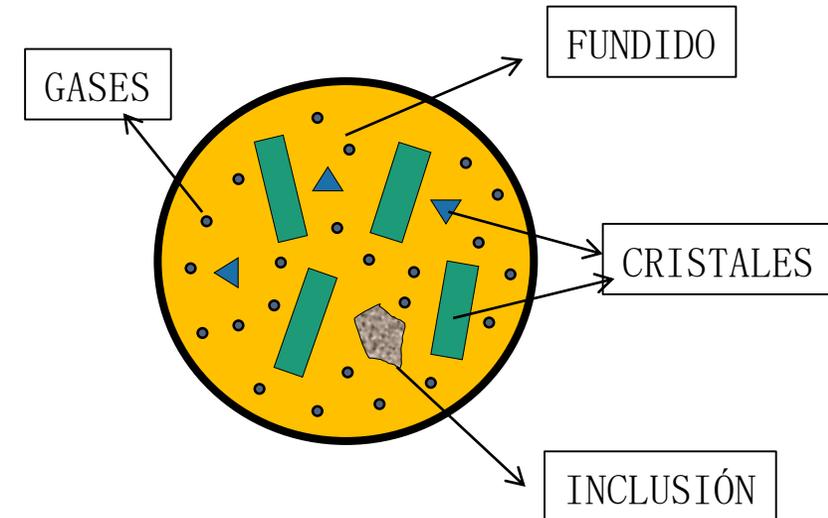
MAGMA

- ✓ Es material rocoso fundido.
- ✓ Consiste en una *mezcla* móvil de **múltiples fases**: líquidas, sólidas y gaseosas.
- ✓ Su temperatura es **alta**. Generalmente entre 700-1250 ° C.

A alta T

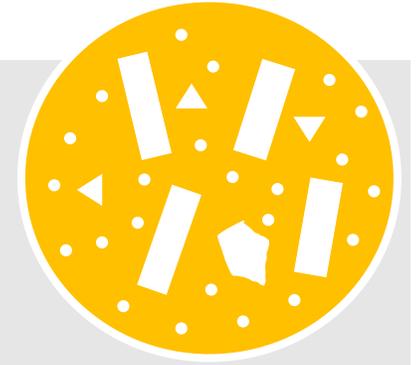


A medida que baja T...



La cantidad y la naturaleza de estas fases dependerá de tres variables intensivas: presión, temperatura y concentración de elementos químicos en el magma.

El líquido o fundido (*melt*)



Composición química

El líquido es multicomponente (O-Si + Al-Ca-Mg-Fe-K-Na)

A. Silicático (Si + O):

Ácidos o de alta sílice
(*RIOLÍTICOS-GRANÍTICOS*)



66-77 % SiO₂ (*O-Si-Al-Na-K-H*)

Intermedios
(*ANDESÍTICOS-DACÍTICOS*)



52-66 % SiO₂

Básicos o de baja sílice
(*BASÁLTICOS*)



45-52 % SiO₂ (*O-Si-Al-Ca-Mg-Fe*)

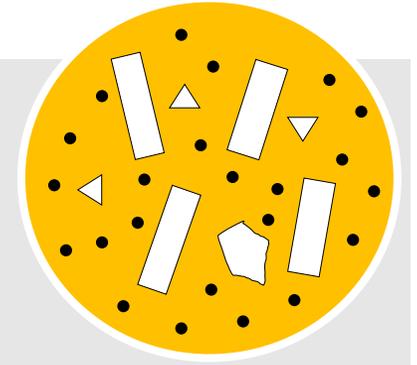
Ultrabásicos



37-45 % SiO₂

B. Carbonatítico: (son raros) tienen un 40-50 % CO₃⁻²

Los gases disueltos (volátiles o fluidos supercríticos)



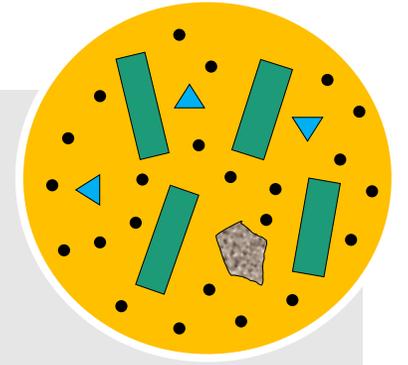
- ✓ Principalmente H_2O y CO_2 (+ SO_2 , H_2S , HCl , HF , etc.).
- ✓ El H_2O disuelta en el fundido se encuentra en dos formas:
como H_2O molecular y como grupo hidroxilo OH^- . Cuando están presentes suficientes volátiles totales, el fundido se sobresatura y se forma vapor o un fluido supercrítico.
- ✓ Su concentración (% total) depende de la composición del magma:

SUPERIOR para magmas ricos en sílice, *MENOR* en magmas de baja sílice

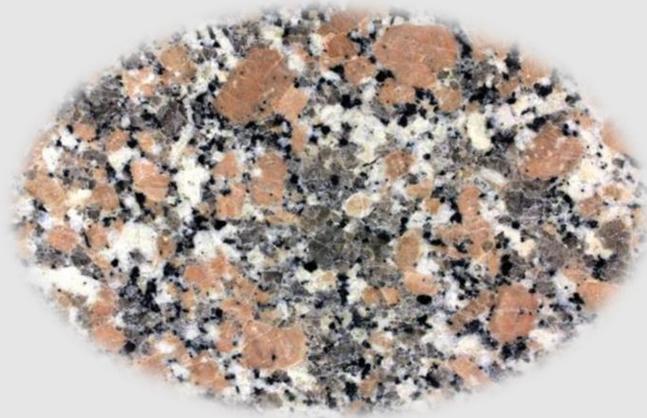
- ✓ Se encuentran en solución a alta presión (profundidad).
- ✓ Se produce su exsolución cuando la presión disminuye \Rightarrow burbujas y expansión (explosión).

Un **fluido supercrítico** (FSC) es cualquier sustancia que se encuentre en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico, lo que hace que se comporte como un híbrido entre un líquido y un gas.

Cristales



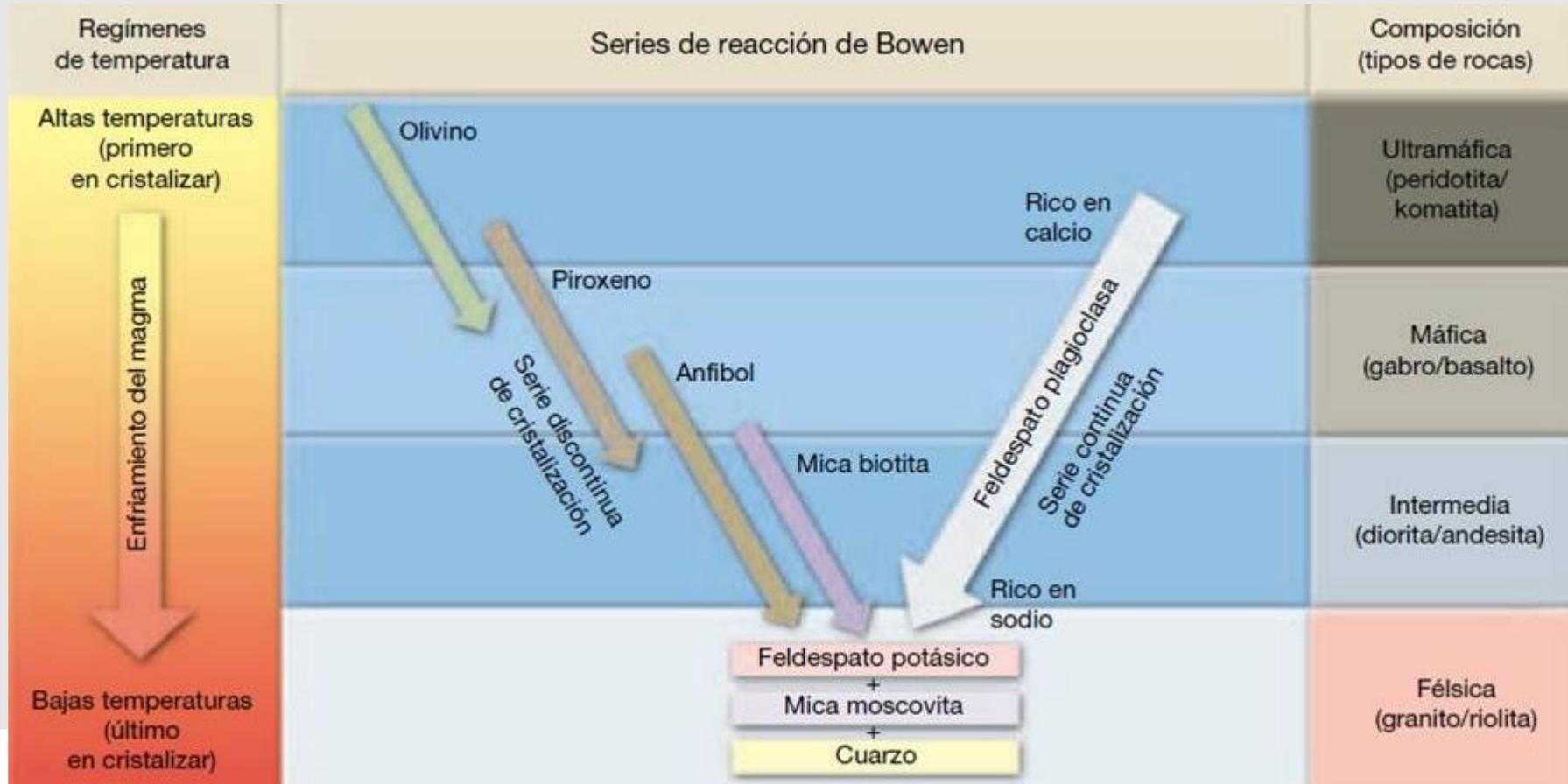
- ✓ Sólo 7 minerales o grupos de minerales principales componen la mayoría de las rocas ígneas



1. *Cuarzo*
2. *Feldespatos*
3. *Micas*
4. *Anfíboles*
5. *Piroxenos*
6. *Olivino*
7. *Óxidos de Fe-Ti.*

- ✓ La asociación de minerales que constituyen una determinada roca ígnea depende de la P y T del último estado de equilibrio del sistema de formación de la roca y de su composición química.

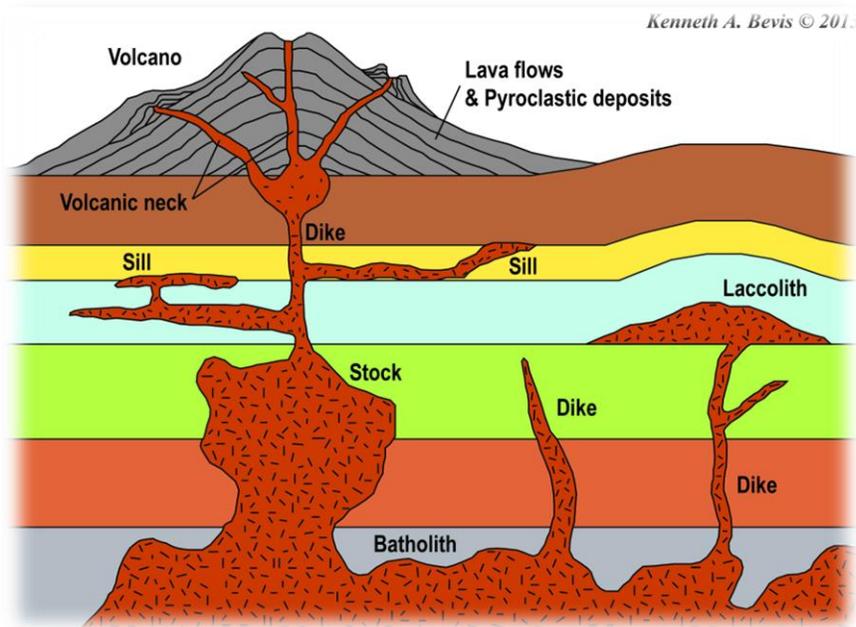
- ✓ La asociación de minerales que constituyen una determinada roca ígnea depende de la P y T del último estado de equilibrio del sistema de formación de la roca y de su composición química.



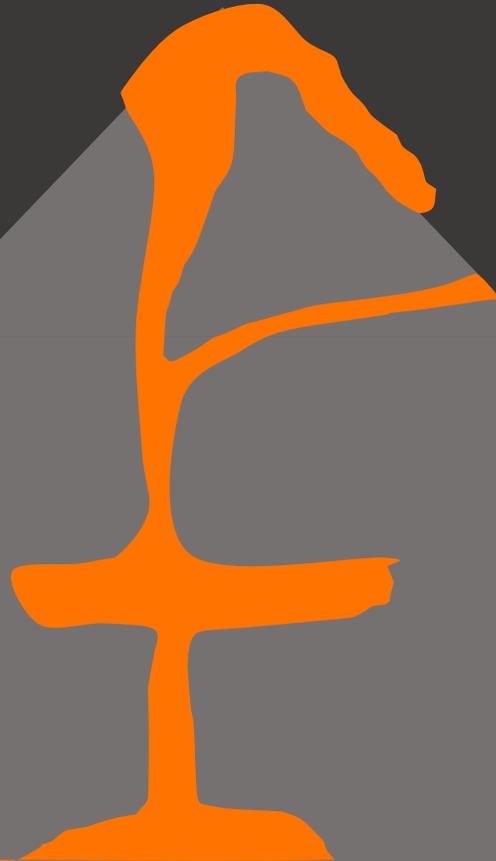
El ascenso y emplazamiento del magma puede ser...

- Profundo:
rocas *plutónicas* o
intrusivas

- Superficial:
rocas *volcánicas* o
extrusivas



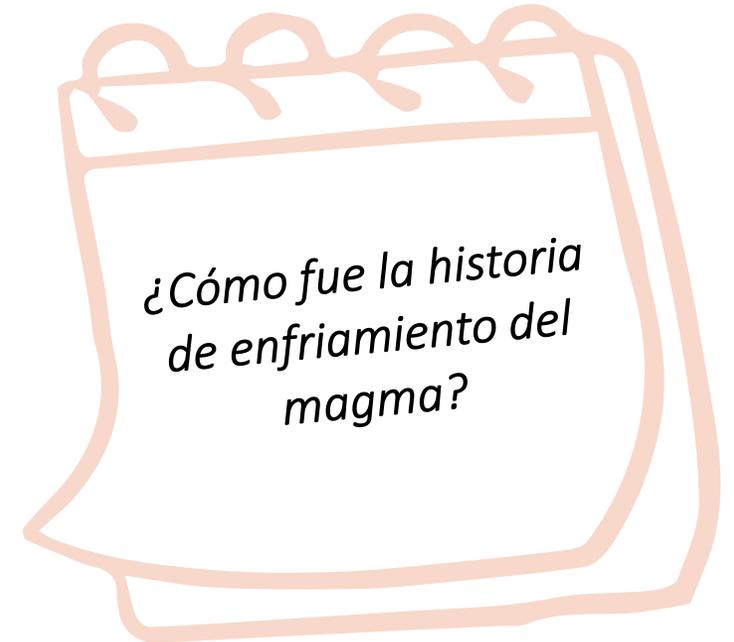
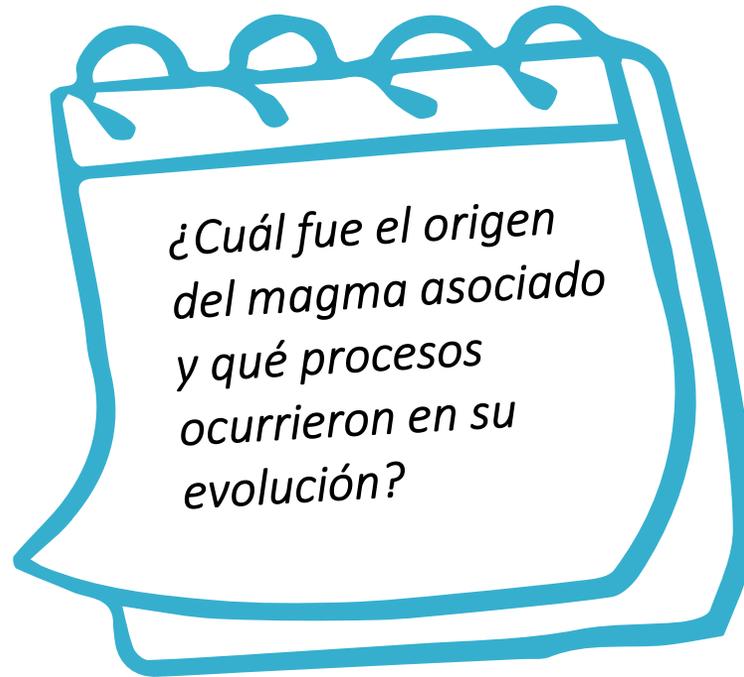
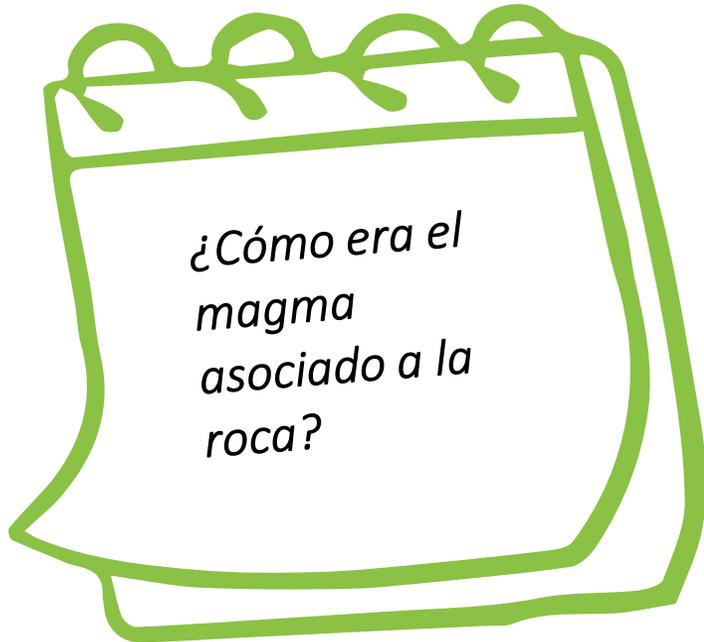
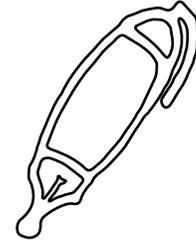
MAGMA VS LAVA



Lava: es magma que ha alcanzado la superficie a través de los conductos volcánicos.

En Petrología, los problemas se resuelven generalmente de forma inductiva:

Dada una roca ígnea y sus propiedades observables...



Una roca ígnea es una roca formada por el enfriamiento de un magma.

Pero, ¿cómo reconocemos a un magma hecho roca si no vemos directamente su enfriamiento?

CRITERIOS DE RECONOCIMIENTO DE LAS ROCAS ÍGNEAS:

- De afloramiento: en general cuerpos de magmas enfriados en profundidad “cortan” las rocas circundantes, truncando estructuras, laminaciones y foliaciones. También los cuerpos de rocas ígneas formadas en profundidad pueden tener bordes de grano fino por rápido enfriamiento en el contacto con las rocas circundantes.
- Texturales: presencia de cristales euhedrales (caras cristalinas bien formadas), presencia de vidrio, presencia de pasta (con vidrio y cristales menores llamados microlitos).

Muestreo



¡¡Las muestras deben reunir ciertas características para la validez y confiabilidad de los datos!!



Sin alteración ni evidencias de meteorización



Sin o con muy pocos minerales/pátinas como: carbonatos, arcillas y óxidos.
Mejor si cuesta romperse y se parte en fragmentos angulosos.



1. Composición de las rocas ígneas.

| Rhyolite (Granite) | Dacite (Granodiorite) | Andesite (Diorite) | Basalt (Gabbro) |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| — | | — | Olivine |
| — — | — — | — — | Orthopyroxene |
| — — | — — | — — | Clinopyroxene |
| — | Hornblende | — | |
| Biotite | — | | |
| Muscovite | | | |
| | Plagioclase (% An) | | |
| | 30 | 50 | |
| Alkali feldspar | — | | |
| Quartz | — — | | |
| | Fe-Ti oxides | | |

— INCREASING TEMPERATURE —>

Minerales formadores de roca

Cuarzo, plagioclasa, feldespatos alcalinos, feldespatoides, muscovita, olivino, piroxeno, anfíbol, biotita.

FÉLSICOS (*feldespato + sílice*)

MÁFICOS (*ferromagnesianos*)

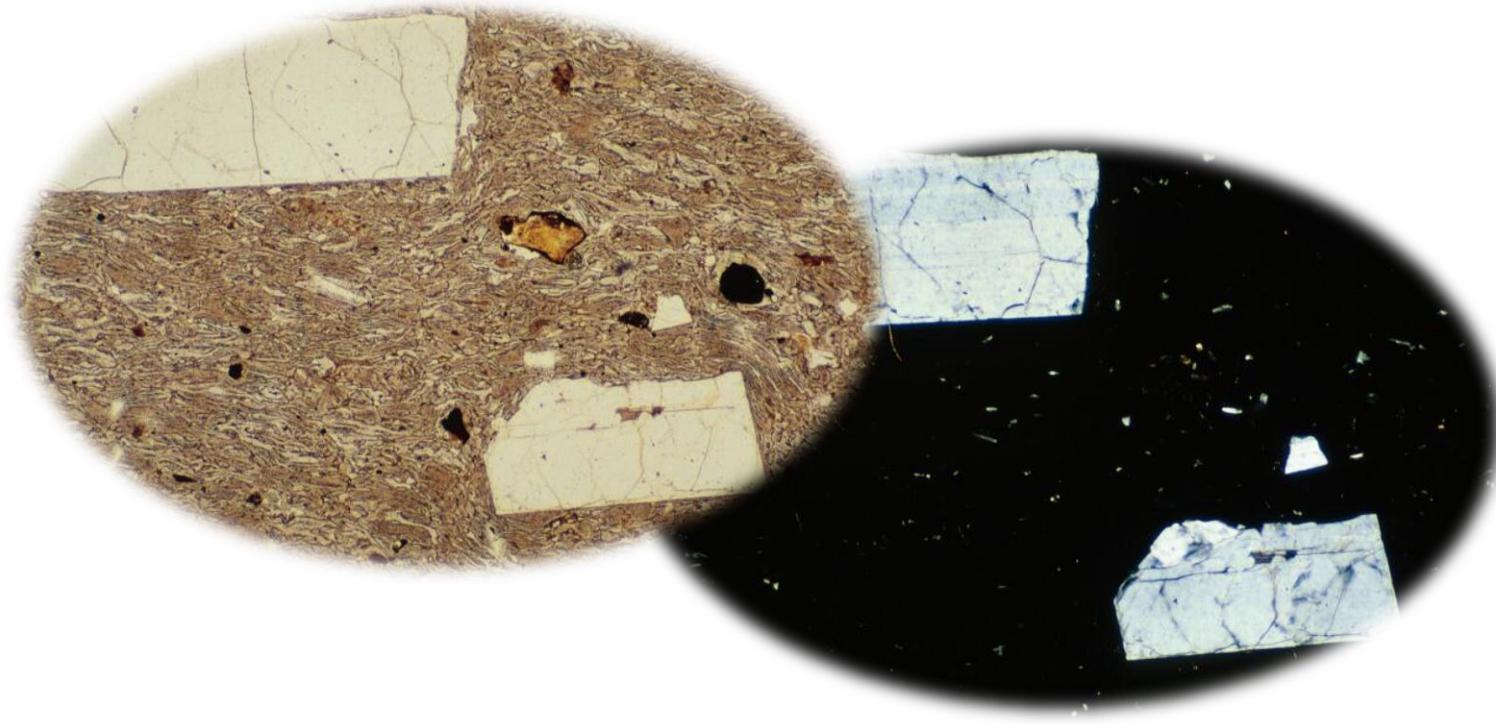
Todos los minerales formadores de roca son soluciones sólidas, excepto el cuarzo.

- ✓ MINERALES ACCESORIOS: apatita, circón, monacita, titanita, óxidos de Fe y Ti, sulfuros, cordierita, granate, turmalina.
- ✓ MINERALES SECUNDARIOS: clorita, arcillas, serpentina, epidoto, carbonatos.

1. Composición de las rocas ígneas.

El vidrio (que no es un mineral)

Se origina a partir del enfriamiento rápido de magmas tal que los átomos en el fundido no tienen la capacidad suficiente para organizarse en una estructura geométrica regular como en los cristales.

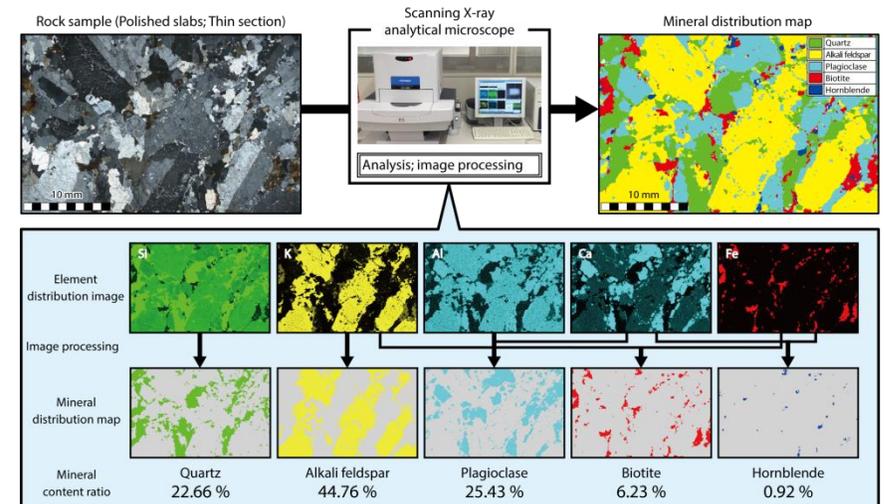
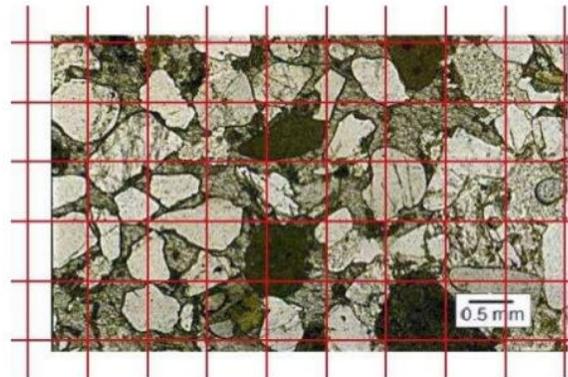
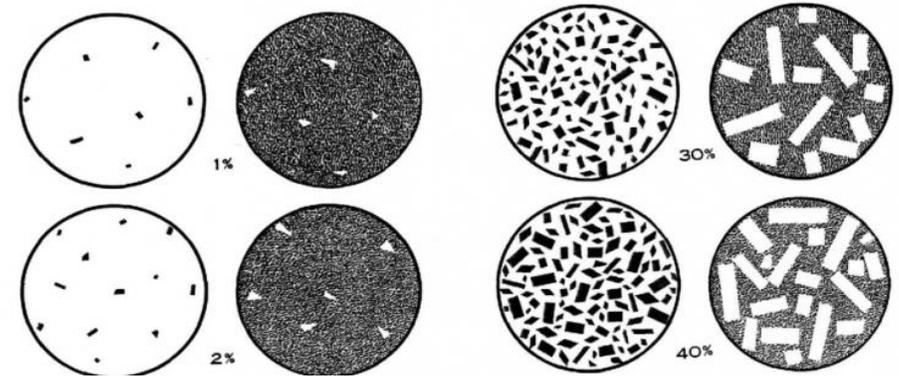


2. Métodos para el reconocimiento de la composición de una roca ígnea.

ANÁLISIS MODAL



Determinación de las proporciones de los minerales que constituyen la roca



ANÁLISIS QUÍMICO



Determinación de la composición química de roca total (lo vemos más adelante...)

Fluorescencia de rayos X



ICP



¿Por qué clasificar a las rocas ígneas?

Clasificación: división del espectro continuo de composición de las rocas ígneas a lo largo de límites específicos y bien definidos acordados.

- ✓ Permite **ORDENAR EL CONOCIMIENTO**.
- ✓ Permite eliminar conflictos en la comprensión de la información.
- ✓ Permite hablar un único idioma al definir terminologías, antes utilizadas en forma arbitraria.

Subcomisión de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, en inglés) sobre la Sistemática de las Rocas Ígneas (Le Maitre, 1989)

3. Criterios empleados para la clasificación de las rocas ígneas.

Según:

- I. Relación de campo, lugar de emplazamiento.
- II. Textura en muestra de mano
- III. Índice de color de la roca
- IV. Análisis modal: Minerales esenciales presentes en la roca
 - *Es el método apropiado para rocas de grano grueso (faneríticas).*
- V. Análisis químico: composición de elementos mayores
 - *Es el método apropiado para rocas de grano fino (afaníticas).*

I. Según su relación de campo y lugar de emplazamiento

ROCAS PLUTÓNICAS o INTRUSIVAS

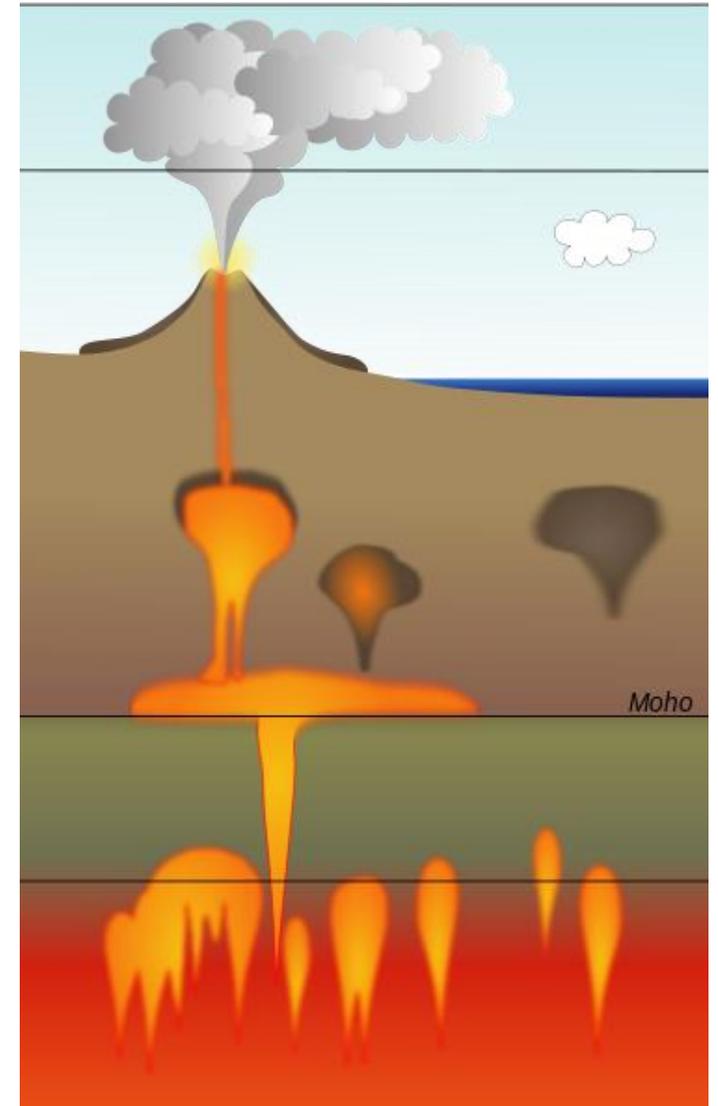
Son rocas formadas por el enfriamiento lento del magma en profundidad.

ROCAS VOLCÁNICAS o EXTRUSIVAS

Son rocas formadas por el enfriamiento del magma luego de ser extruido a la superficie a través de las erupciones volcánicas, como flujos coherentes de lava o como depósitos fragmentados (rocas piroclásticas).

ROCAS SUBVOLCÁNICAS o HIPABISALES

Son rocas originadas por el enfriamiento del magma a baja profundidad. En general forman diques o *sills*.



II. Según su textura macroscópica

* Categorías según tamaño de los componentes

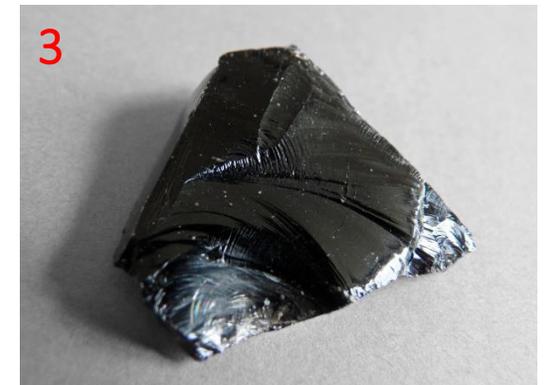
- A. ROCAS FANERÍTICAS
- B. ROCAS AFANÍTICAS
- C. ROCAS PORFÍRICAS
- D. ROCAS VOLCANICLÁSTICAS

* Categorías según grado de cristalinidad

- 1. ROCAS HOLOCRISTALINAS
- 2. ROCAS HIPOCRISTALINAS
- 3. ROCAS HIALINAS O VÍTREAS

Según el porcentaje de vidrio presente:

- ✓ 0 – 20% de vidrio = vitrífero (glass-bearing)
- ✓ 20 – 50% de vidrio = vítrico (glass-rich)
- ✓ 50 – 80% de vidrio = vítreo (glassy)
- ✓ 80 – 100% nombres específicos (obsidiana, taquilita, etc.)



* Así...

A. ROCAS
INTRUSIVAS



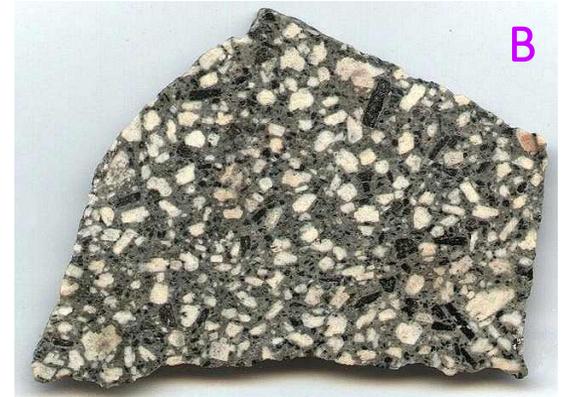
Rocas faneríticas holocristalinas
Rocas faneríticas porfíricas
holocristalinas



B. ROCAS
VOLCÁNICAS



Rocas porfíricas hipocristalinas
Rocas afaníticas
Rocas vítreas
Rocas volcaniclásticas (piroclásticas)



C. ROCAS
SUBVOLCÁNICAS



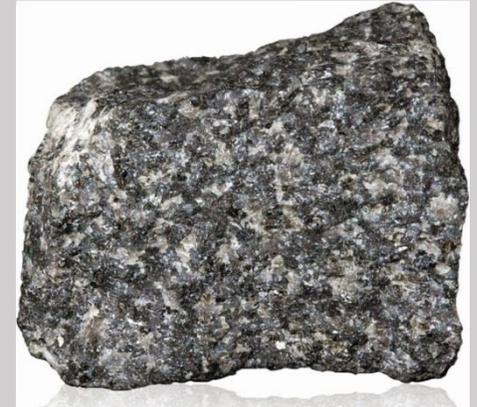
Texturas intermedias entre
rocas intrusivas y volcánicas



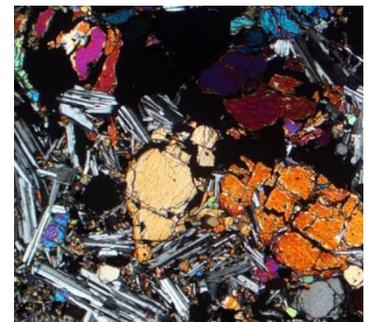
III. Según índice de color de la roca

Se basa en el porcentaje de minerales máficos presentes en la roca.

| | |
|------------------|------------|
| HOLOLEUCOCRÁTICA | 0 – 5 % |
| LEUCOCRÁTICA | 5 – 35 % |
| MESOCRÁTICA | 35 – 65 % |
| MELANOCRÁTICA | 65 – 90 % |
| ULTRAMÁFICA | 90 – 100 % |



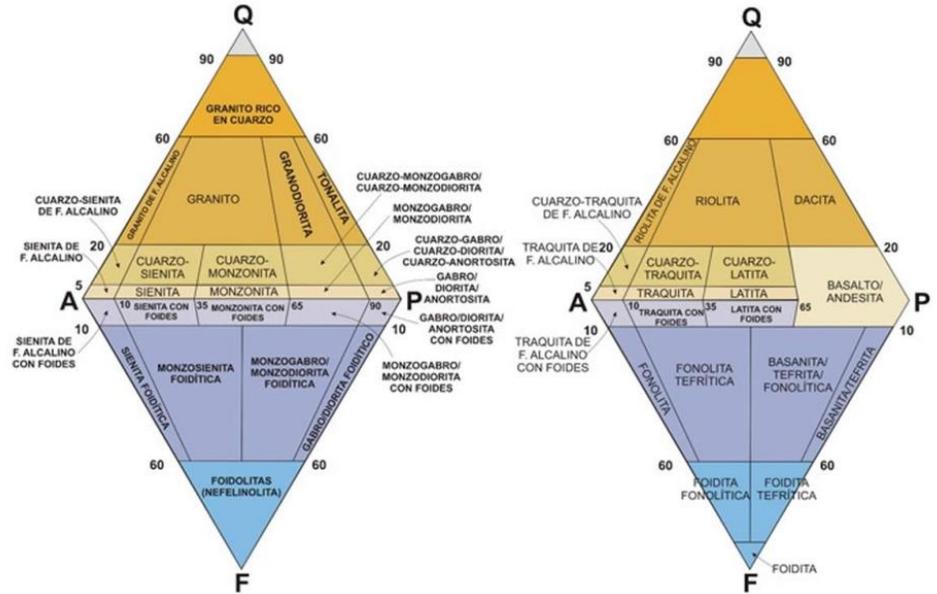
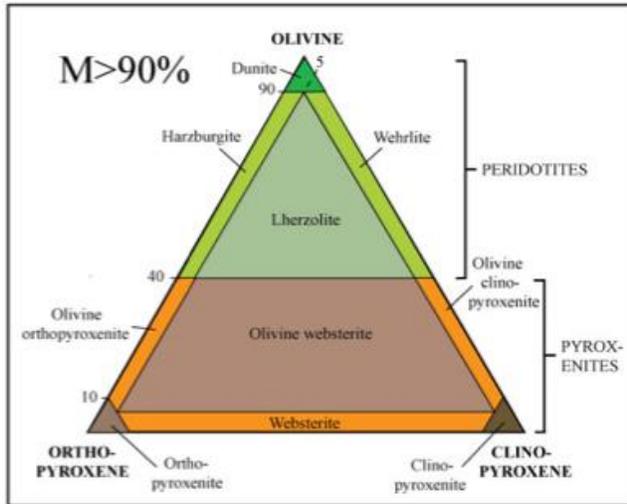
¿Pero qué sucede con las rocas volcánicas normalmente porfíricas o afaníticas?



IV. Análisis modal: Minerales esenciales presentes en la roca

* Si hay <90 % de minerales máficos

Se utiliza el doble diagrama QAPF [denominado de acuerdo a los minerales esenciales].



* Si hay >90 % de minerales máficos

Se utilizan diagramas triangulares específicos para rocas ultramáficas.

* Si hay <90 % de minerales máficos

DOBLE DIAGRAMA QAPF O DE STRECKEISEN

Procedimiento:

1. Estimación modal
2. Parámetros Q,A,P o F,A,P con los que se entrará al diagrama:

$$Q = 100 * \text{cuarzo} / (\text{cuarzo} + \text{plagioclasa} + \text{feldespatos alcalinos})$$

$$F = 100 * \text{feldespatoides} / (\text{feldespatoides} + \text{plagioclasa} + \text{feldespatos alcalinos})$$

$$P = 100 * \text{plagioclasa} / (\text{plagioclasa} + \text{feldespatos alcalinos})$$

$$A = 100 - P$$

[Siendo los feldespatos alcalinos: feldespatos potásicos y plagioclasas con An<5%]

3. Se define la textura (fanerítica vs afanítica/porfírica) de la roca para elegir el diagrama de clasificación (RV vs RP)

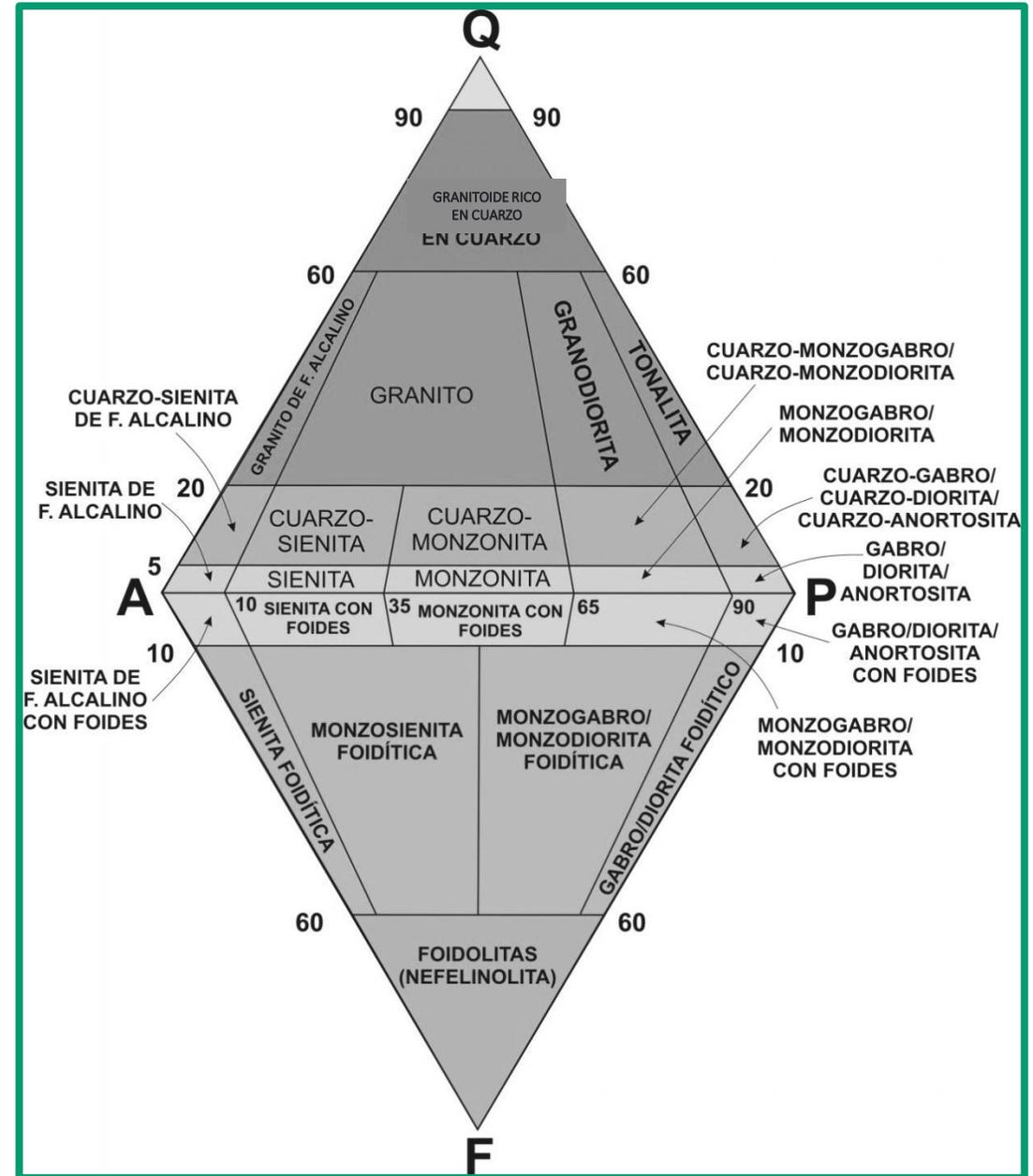
Si la roca es intrusiva
(fanerítica holocristalina)



¿Pero qué sucede con las rocas plutónicas que clasifican con más de una composición?

Campo 10 (diorita, gabro, anortosita): se diferencian de acuerdo al índice de color y a la composición promedio de la plagioclasa. Así:

- ✓ ANORTOSITA ($M < 10 \%$)
- ✓ DIORITA ($10 \% < M < 45 \%$, plagioclasa $An_0 - An_{50}$)
- ✓ GABRO ($45 \% < M < 90 \%$, plagioclasa $An_{50} - An_{100}$)

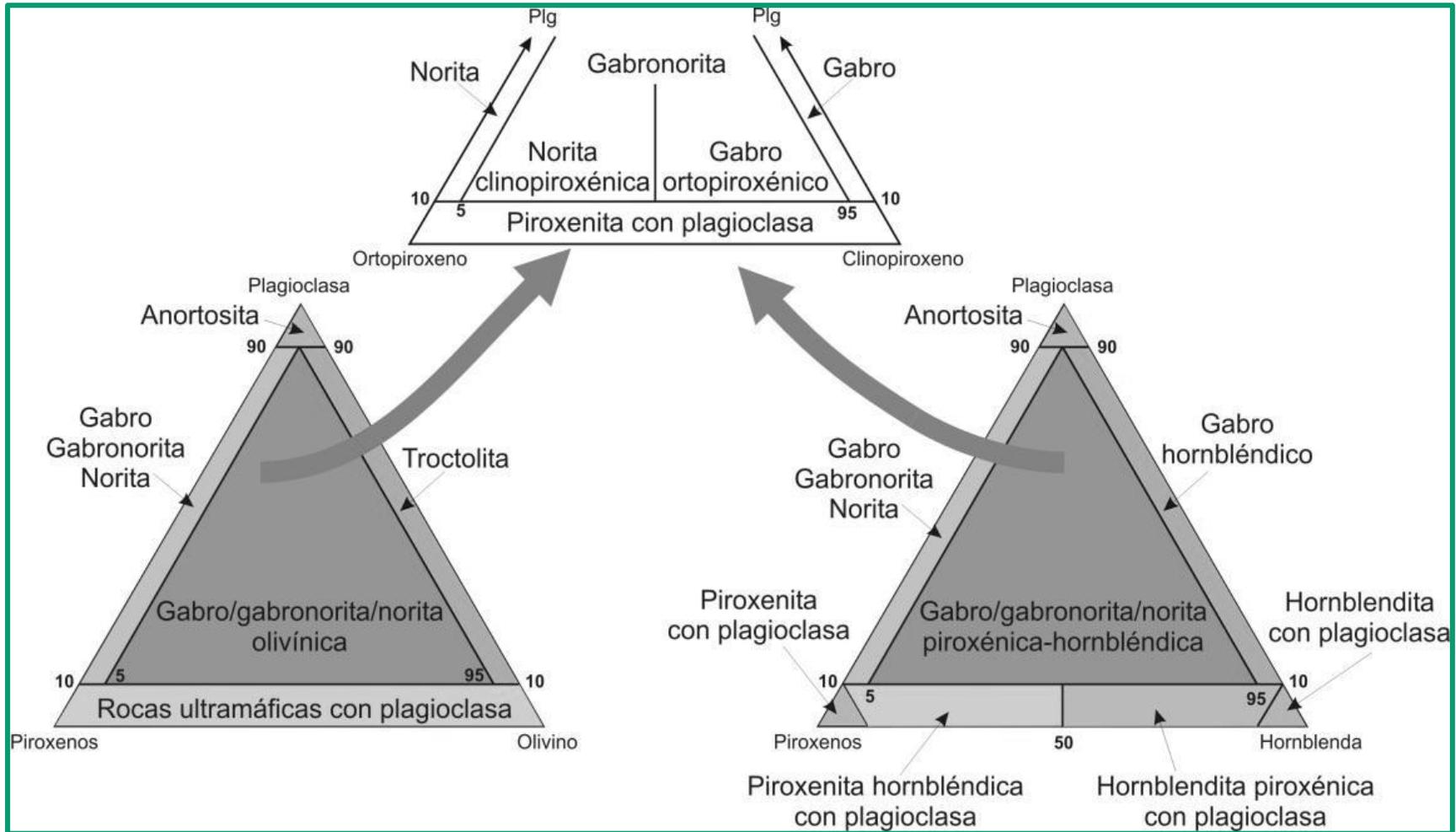


Términos modificatorios

La IUGS acepta agregar términos que revelen ciertos aspectos descriptivos (químicos, mineralógicos y/o texturales) al nombre principal.

- Relacionado a su índice de color: leucogranito, melagranito. (útil porque los máficos no son empleados en la clasificación QAPF!)
- Relacionado a su textura característica: granito porfírico, granito rapakivi, granito aplítico, granito pegmatítico...
- Relacionado a minerales característicos no incluidos en la clasificación QAPF: granito de biotita y muscovita, granito riebeckítico...
- Relacionado con aspectos químicos relevantes: granito peraluminoso, granito alcalino...

Rocas gábricas/ Gabroides



Si la roca es porfírica hipocrystalina

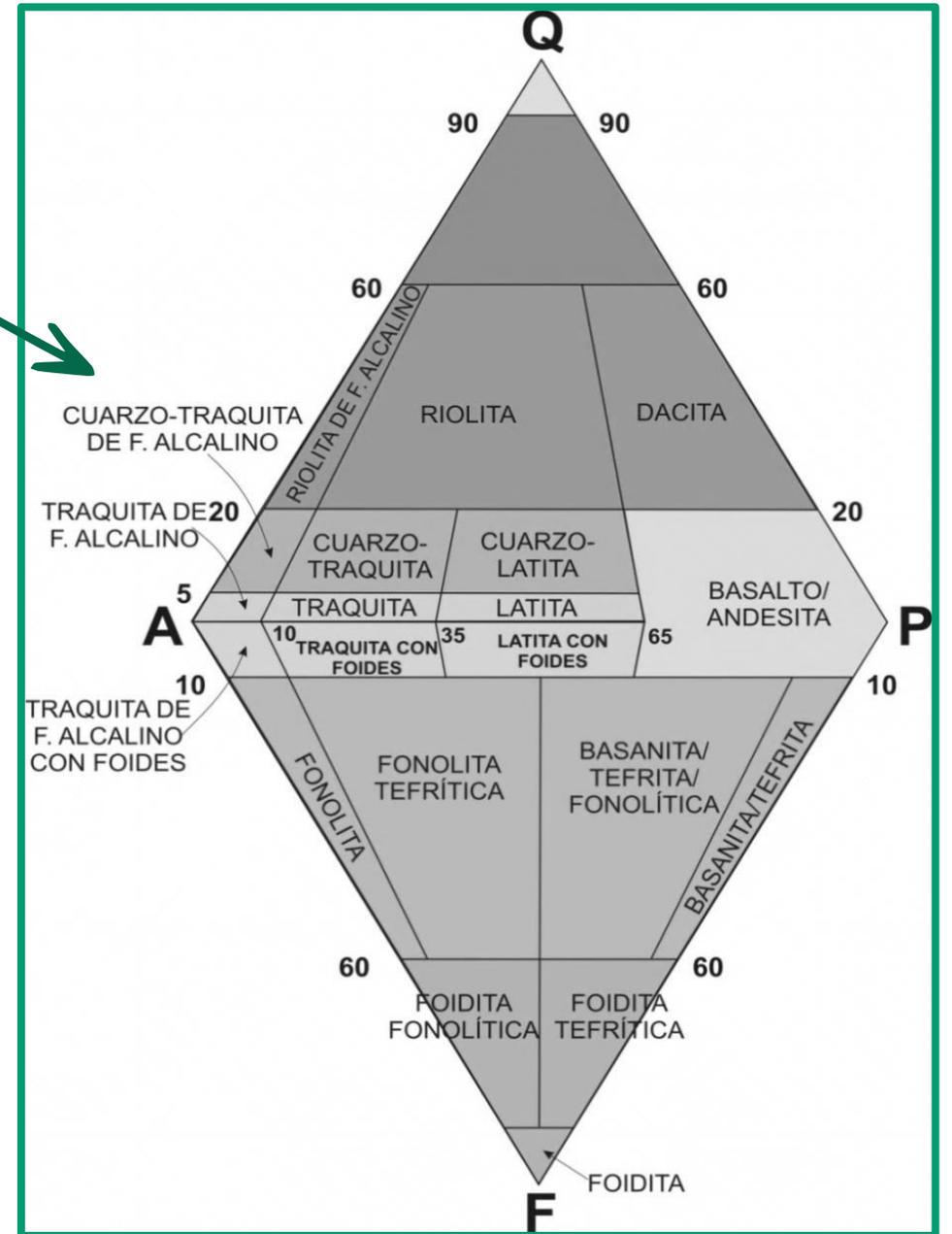


¿Pero qué sucede con las rocas porfíricas con pastas afaníticas?

Clasificación basada en FENOCRISTALES.

FENOTIPOS

P.ej.: *fenoandecita*.

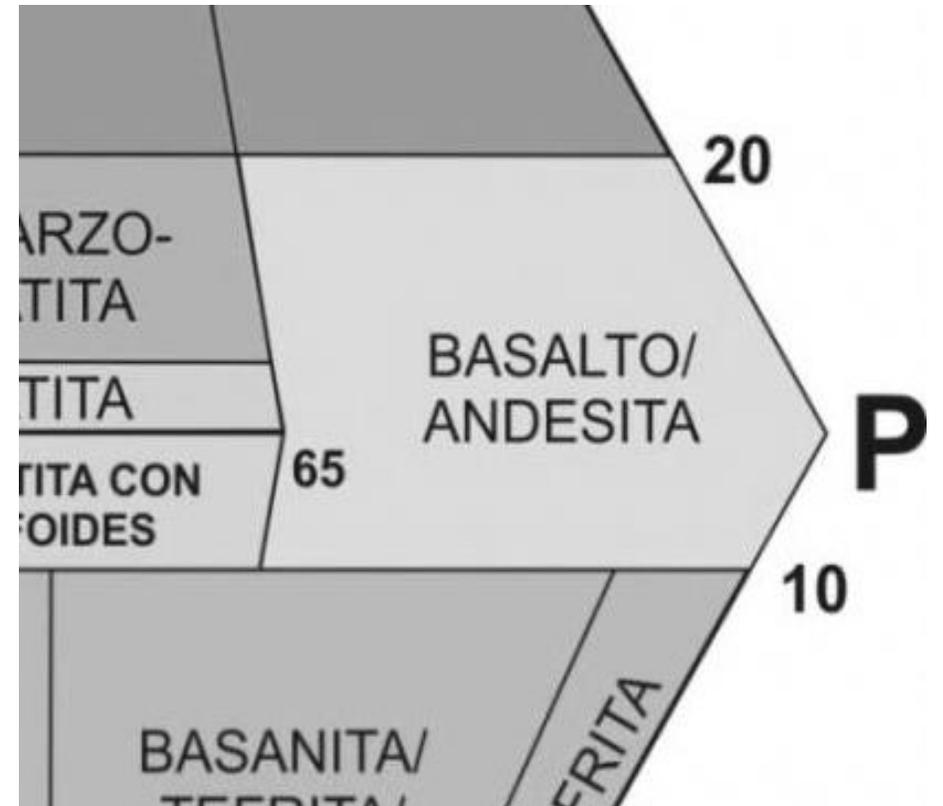




¿Pero qué sucede con las rocas volcánicas que clasifican en el campo 10?

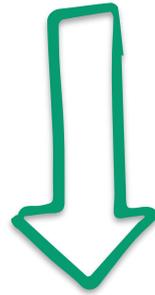
Campo 10 (andesita, basalto): se diferencian de acuerdo al índice de color (M), y si se dispone de la información química, del contenido de SiO₂ (andesita > 52 %).

- ✓ BASALTO (M > 35 %)
- ✓ ANDESITA (M < 35 %)





¿Y cómo clasificamos a las rocas subvolcánicas/hipabisales?



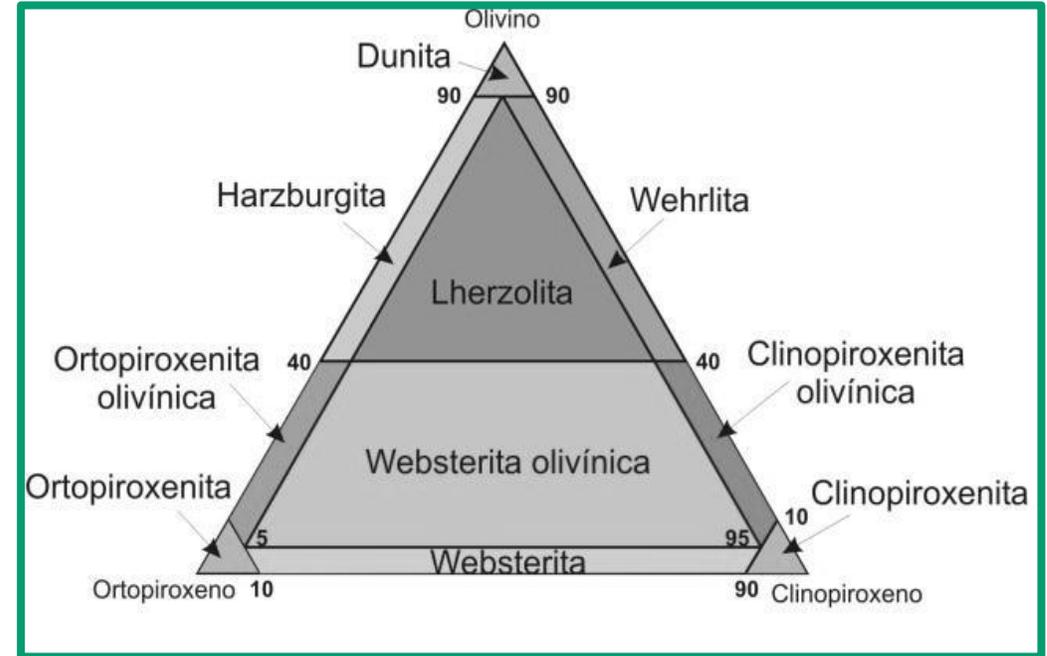
¡De acuerdo a sus características texturales elegiremos el método de clasificación más adecuado!

* Si hay >90 % de minerales máficos

Clasificación de las rocas ultramáficas



Útil para muestras de mano en las que se desconoce el tipo de piroxeno y para rocas ultramáficas con anfíbol.



MANTO

| | |
|--------------------|----------------------------------------|
| | 19-5) |
| Carbonatite | > 50% carbonate |
| Cedricite | Diopside leucite lamproite (Tbl. 19-5) |
| Charnockite | Orthopyroxene granite |
| Comendite | Peralkaline rhyolite |
| Cortlandite | Pyroxene-olivine hornblendite |
| Dacite | Figs. 2-3 and 2-4 |
| Diabase | Medium-grained basalt/gabbro |
| Diorite | Fig. 2-2 |
| Dolerite | Medium-grained basalt/gabbro |
| Dunite | Fig. 2-2 |
| Enderbite | Hypersthene tonalite |
| Essexite | Nepheline monzo-gabbro/diorite |
| Felsite | Microcrystalline granitoid |

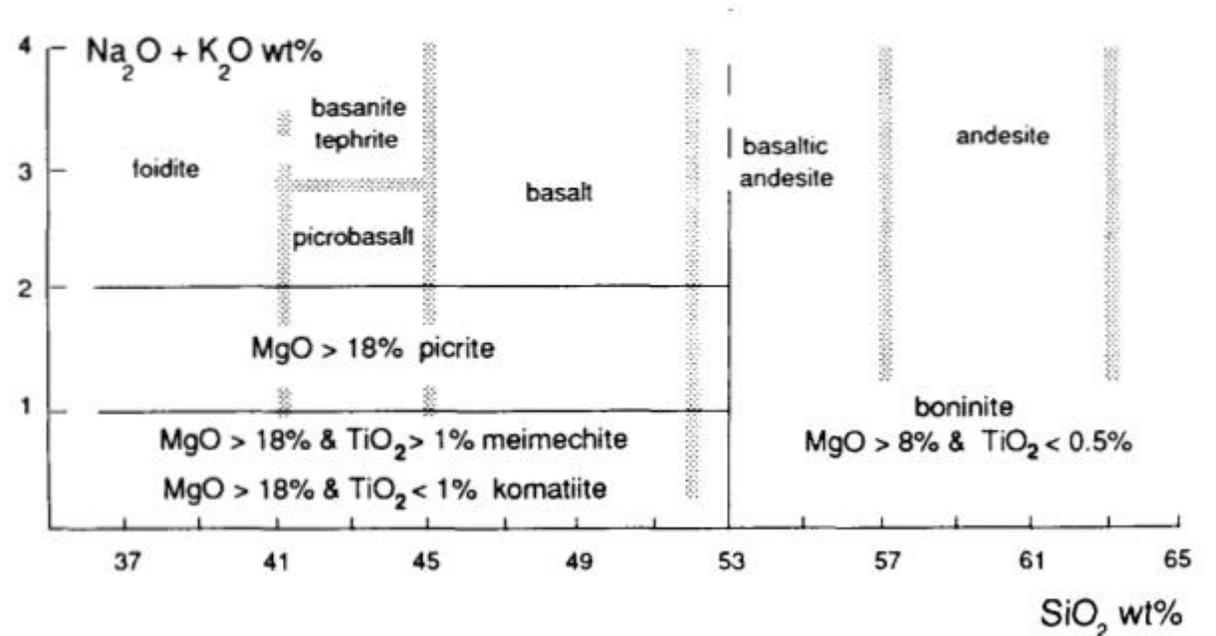
| | |
|-------------------|----------------------------------------------------|
| Liparite | Porphyric granite with tourmaline Lamproite |
| Luxulianite | with poikilitic phlogopite ground-mass (Tbl. 19-5) |
| Madupite | Alkaline ultramafic volcanic Lamprophyre |
| | Aegirine-augite nepheline syenite |
| Mafurite | Leucite-richterite lamproite (Tbl. 19-5) |
| Malchite | Hypersthene monzonite Mg-rich andesite |
| Malignite | Natrolite phonolite Picrite basalt |
| Mamilite | Ultramafic volcanic Ultramafic |
| Mangerite | melilite-clinopyroxene volcanic (Tbl. 19-1) |
| Marianite | Plutonic melilitite |
| Marienbergite | Mafic ijolite |
| Masafuerite | Orbicular gabbro |
| Meimechite | |

¿Pero están todos los tipos de rocas representados en el diagrama QAPF?



Fig. 6. The classification and nomenclature of the 'high-Mg' volcanic rocks (picrite, meimechite, komatiite, boninite) using TAS (thick boundaries) together with MgO and TiO₂ wt% (thin boundaries).

IUGS SYSTEMATICS OF IGNEOUS ROCKS



V. Análisis químico: composición de elementos mayores



Trataremos de incorporar algunos conceptos básicos de geoquímica

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | 18 | | | | | | |
| | H | | | | | | | | | | | He | | | | | | |
| | 1.0079 | | | | | | | | | | | 4.0026 | | | | | | |
| 2 | Li | Be | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne |
| | 6.941 | 9.0122 | | | | | | | | | | | 10.811 | 12.011 | 14.007 | 15.999 | 18.998 | 20.18 |
| 3 | Na | Mg | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar |
| | 22.99 | 24.305 | | | | | | | | | | | 26.982 | 28.086 | 30.974 | 32.066 | 35.453 | 39.948 |
| 4 | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| | 39.098 | 40.078 | 44.956 | 47.88 | 50.941 | 51.996 | 54.938 | 55.847 | 58.933 | 58.693 | 63.546 | 65.39 | 69.723 | 72.61 | 74.922 | 78.96 | 79.904 | 83.8 |
| 5 | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe |
| | 85.468 | 87.62 | 88.906 | 91.224 | 92.906 | 95.94 | (97.91) | 101.07 | 102.91 | 106.42 | 107.87 | 112.41 | 114.82 | 118.71 | 121.76 | 127.6 | 126.9 | 131.29 |
| 6 | Cs | Ba | La | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| | 132.91 | 137.33 | 138.91 | 178.49 | 180.95 | 183.84 | 186.21 | 190.23 | 192.22 | 195.08 | 196.97 | 200.59 | 204.38 | 207.2 | 208.98 | (209) | (210) | (222) |
| 7 | Fr | Ra | Ac | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Uun | Uuu | Uub | | | | | | |
| | (223) | (226) | (227) | (261.1) | (262.1) | (263.1) | (262.1) | (265.1) | (266.1) | (269) | (272) | (277) | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Lanthanide Series | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| | 140.12 | 140.91 | 144.24 | (144.9) | 150.36 | 151.97 | 157.25 | 158.93 | 162.5 | 164.93 | 167.26 | 168.93 | 173.04 | 174.97 |
| Actinide Series | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| | Th | Pa | U | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |
| | 232.04 | 231.04 | 238.03 | (237) | (244.1) | (243.1) | (247.1) | (247.1) | (251.1) | (252.1) | (257.1) | (258.1) | (259.1) | |

Group Legend

- Alkali Metal
- Alkali Earth
- Metal
- Trans. Met.
- Actinides
- Lanthanides
- Non-metal
- Halogen
- Noble Gas

Usos de los datos químicos:

- I. Clasificar las rocas ígneas.
- II. Explorar procesos de génesis y evolución magmática.
- III. Comparar rocas naturales y experimentales.

- ✓ Elementos mayoritarios: $> 0,1 \%$ en peso (en 100g de muestra)
- ✓ Elementos traza: $< 0,1 \%$ en peso o < 1000 ppm.



Algunos elementos pueden ser traza en determinadas rocas pero mayoritarios en otras

El hierro se presenta típicamente en dos estados de oxidación (férrico, Fe_2O_3 y ferroso, FeO) en rocas y minerales, pero la mayoría de los métodos instrumentales no pueden distinguir entre ellos y, por lo tanto, el Fe total se expresa como $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ o como FeOt .

- ✓ Elementos volátiles: pérdida por ignición (LOI). Se calienta la muestra a más de 1000°C y se calcula la diferencia de peso.



Oxidos mayores (> a 0.1 %)

SiO₂
TiO₂
Al₂O₃
Fe₂O₃
FeO
MnO
MgO
CaO
Na₂O
K₂O
P₂O₅

| Muestra | 1 |
|--------------------------------|--------|
| SiO ₂ | 66.86 |
| TiO ₂ | 0.65 |
| Al ₂ O ₃ | 16.80 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.76 |
| FeO | |
| MnO | 0.04 |
| MgO | 1.57 |
| CaO | 2.70 |
| Na ₂ O | 2.65 |
| K ₂ O | 4.41 |
| P ₂ O ₅ | 0.22 |
| LOI | 2.27 |
| Total | 101.92 |

H₂O, F, Cl, CO₂, SO₂ (LOI: pérdida por calcinación a 1000 °C)

Minoritarios y trazas (0.1-0.01 %- p.p.m.)

Sn
Pb
Sc
V
K
Rb
Cs
Ba
Sr
Ta
Nb
Hf
Zr

Y
Th
U
Cr
Co
Ni
Cu

| Muestra | 1 |
|---------|--------|
| Sr | 292.00 |
| Ba | 484.00 |
| Rb | 121.00 |
| Zr | 128.00 |
| Y | 27.00 |
| Cs | 8.60 |
| U | 6.20 |
| Th | 11.50 |
| Hf | 4.50 |
| Nb | 27.00 |
| Sc | 12.30 |
| Cr | 61.00 |
| Ni | 10.00 |
| Ta | 2.48 |
| Co | 27.00 |
| La | 31.10 |
| Ce | 60.60 |
| Nd | 22.20 |
| Sm | 5.12 |
| Eu | 1.27 |
| Tb | 0.71 |
| Dy | 4.51 |
| Yb | 2.62 |
| Lu | 0.39 |

La
Ce
Pr
Nd
Sm
Eu
Gd
Tb
Dy
Ho
Er
Tm
Yb
Lu

Representación de los resultados de los análisis químicos.

*TABLA de exposición de los resultados de los análisis químicos de roca total.
Elementos mayores y traza de 6 muestras.*

| Sample Petrography | SE1 LGo | SE2 HbGo | SE3 Mdi | SE4 Mdi | SE5 Mdi | SE6 PIMdi |
|---------------------------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|-----------|
| SiO ₂ | 47.72 | 52.73 | 57.80 | 59.83 | 60.01 | 55.89 |
| TiO ₂ | 1.12 | 0.77 | 0.84 | 0.73 | 0.69 | 0.20 |
| Al ₂ O ₃ | 15.70 | 5.00 | 14.48 | 15.52 | 15.35 | 24.88 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 13.39 | 15.80 | 9.38 | 7.78 | 7.73 | 2.38 |
| MnO | 0.16 | 0.25 | 0.12 | 0.12 | 0.10 | 0.00 |
| MgO | 8.28 | 13.24 | 5.10 | 3.93 | 4.00 | 1.05 |
| CaO | 10.93 | 11.25 | 6.57 | 5.59 | 5.62 | 8.14 |
| Na ₂ O | 1.64 | 0.98 | 3.49 | 3.82 | 3.77 | 5.43 |
| K ₂ O | 1.61 | 1.02 | 2.69 | 3.21 | 3.16 | 2.07 |
| P ₂ O ₅ | 0.66 | 0.41 | 0.38 | 0.16 | 0.27 | 0.17 |
| Total | 101.22 | 101.44 | 100.85 | 100.71 | 100.70 | 100.21 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 1.02 | 0.96 | 1.30 | 1.19 | 1.19 | 2.62 |
| Cr | 426 | 889 | 248 | 174 | 196 | 78 |
| Ni | 85 | 156 | 49 | 41 | 43 | 14 |
| Co | 59 | 77 | 43 | 40 | 59 | 26 |
| V | 308 | 343 | 190 | 140 | 154 | 51 |
| Zn | 93 | 107 | 79 | n.a. | 69 | 28 |
| Cu | 161 | 42 | 88 | n.a. | 54 | 34 |
| Ga | 29 | 13 | 16 | n.a. | 15 | 20 |
| Rb | 68 | 38 | 96 | 120 | 129 | 68 |
| Ba | 185 | 71 | 505 | 549 | 577 | 541 |
| Sr | 431 | 69 | 426 | 486 | 490 | 1042 |
| Nb | n.a. | 5 | n.a. | 11 | 5 | n.a. |
| Zr | 58 | 104 | 174 | 164 | 160 | 30 |
| Y | 23 | 28 | 19 | 18 | 16 | 7 |
| Th | 17 | 10 | 8 | n.a. | 10 | 6 |
| La | 15.07 | 17.16 | 23.18 | 25.64 | 21.73 | 12.14 |
| Ce | 34.26 | 39.16 | 49.58 | 49.45 | 45.34 | 17.84 |
| Nd | 18.57 | 24.19 | 22.72 | 22.47 | 20.43 | 7.42 |
| Sm | 3.94 | 6.58 | 5.41 | 5.1 | 4.75 | 1.47 |
| Eu | 1.08 | 1.2 | 1.28 | 1.48 | 1.15 | 1.16 |
| Gd | 3.13 | 5.76 | 4.77 | 3.82 | 3.83 | 0.88 |
| Dy | 2.89 | 4.69 | 3.53 | 3.11 | 2.89 | 0.81 |
| Er | 1.49 | 2.37 | 1.92 | 1.71 | 1.61 | 0.37 |
| Yb | 1.418 | 2.42 | 1.91 | 2.02 | 1.48 | 0.35 |
| Lu | 0.229 | 0.39 | 0.31 | 0.37 | 0.24 | 0.05 |

CALIDAD DE LOS DATOS

En términos generales, si un análisis enumera todos los óxidos principales, incluida el H₂O, y el total se encuentra entre 98,8 % en peso y 100,8 % en peso, el análisis se considera aceptable.

V. Análisis químico: composición de elementos mayores

Las rocas ígneas constituyen un espectro continuo de composiciones

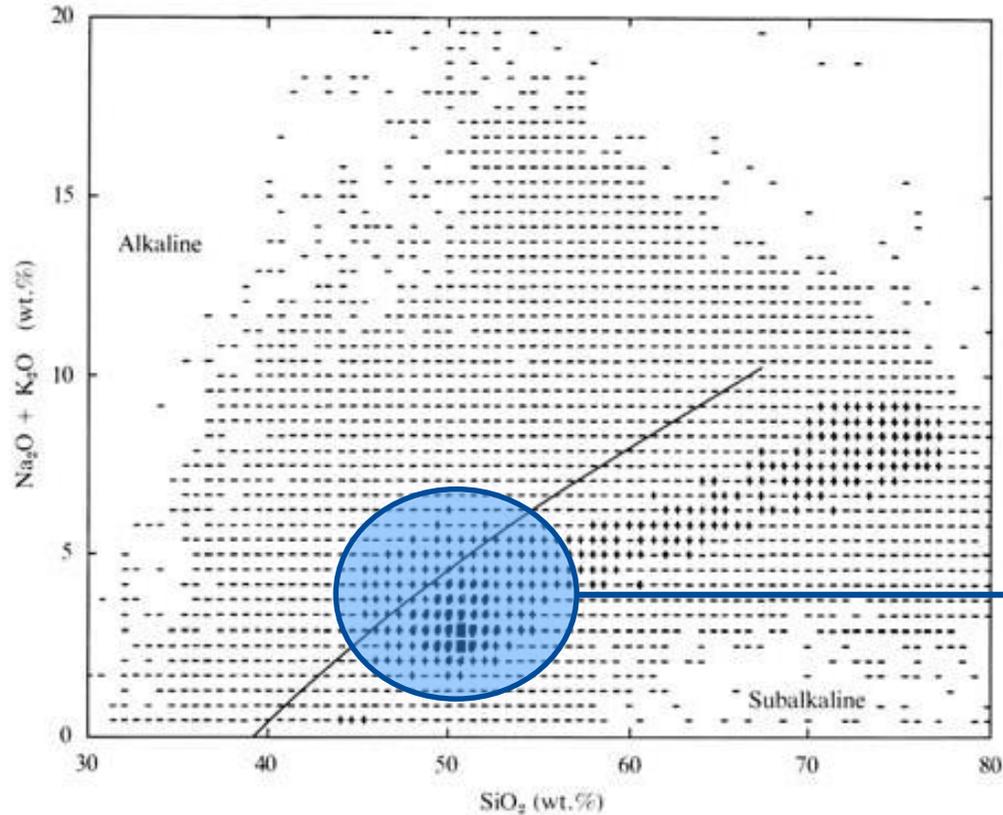
* De acuerdo al contenido absoluto de SiO_2

| | |
|--------------|--------------------------|
| ÁCIDAS | > 66 % SiO_2 |
| INTERMEDIAS | 66 – 52 % SiO_2 |
| BÁSICAS | 52 – 45 % SiO_2 |
| ULTRABÁSICAS | < 45 % SiO_2 |



¡Ácido y básico no hacen referencia al pH!

Diagramas de Clasificación



Las rocas ígneas forman un espectro continuo de composiciones

Existe cierta arbitrariedad en los límites entre campos



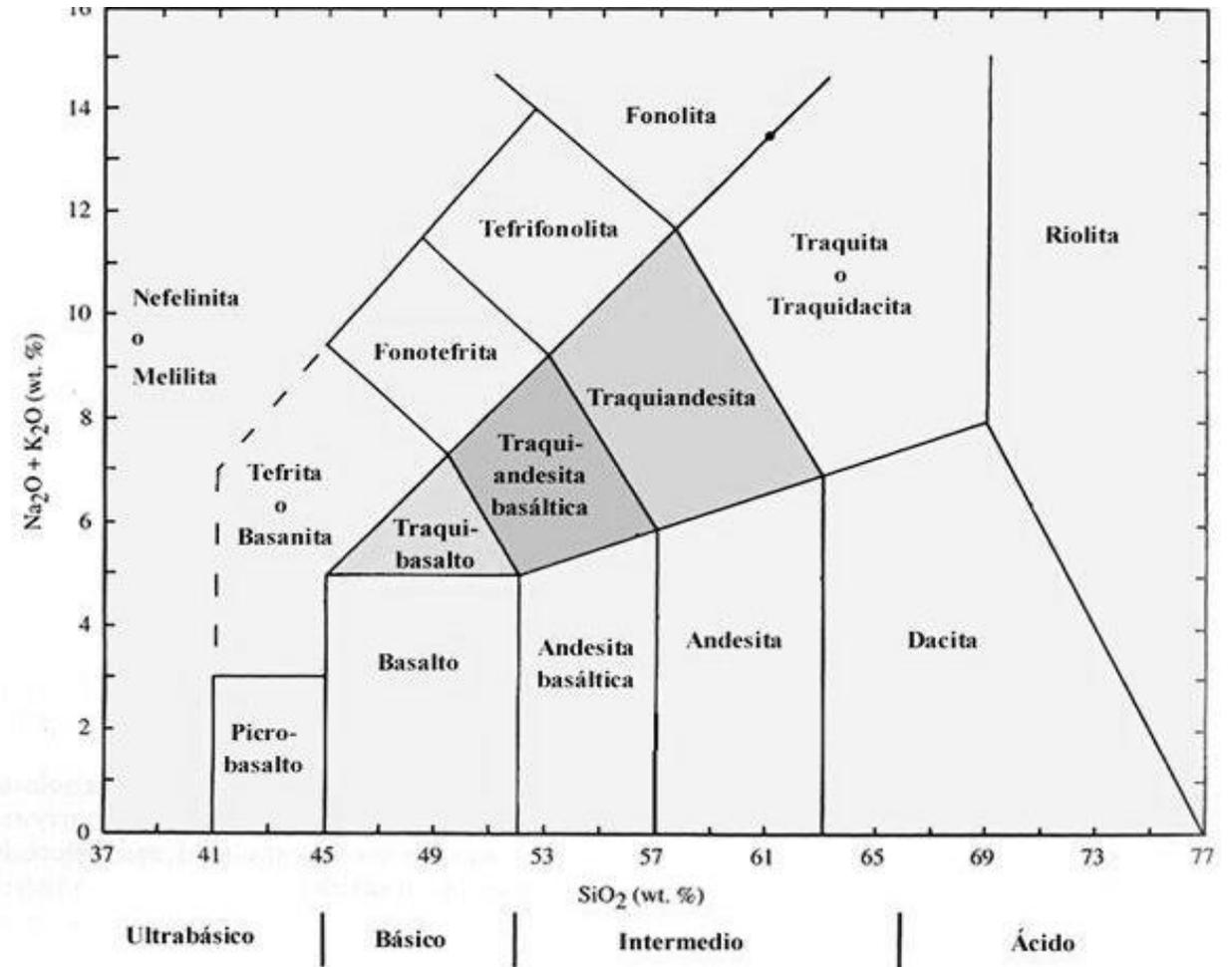
Ploteo de 41.000 análisis químicos de rocas de todo el mundo y de todas las edades

Álcalis total vs. Sílice

Posterior a Le Bas *et al.* (1986) *J. Petrol.*, **27**, 745-750.
Oxford University Press.

Debe emplearse cuando:

- ROCAS VOLCÁNICAS
- texturas afaníticas a vítreas.
- cuando la textura es porfírica:
- frescas ($H_2O+ < 2\%$ and $CO_2 < 0,5\%$) y cuya composición química haya sido recalculada en base libre de H_2O y CO_2 .



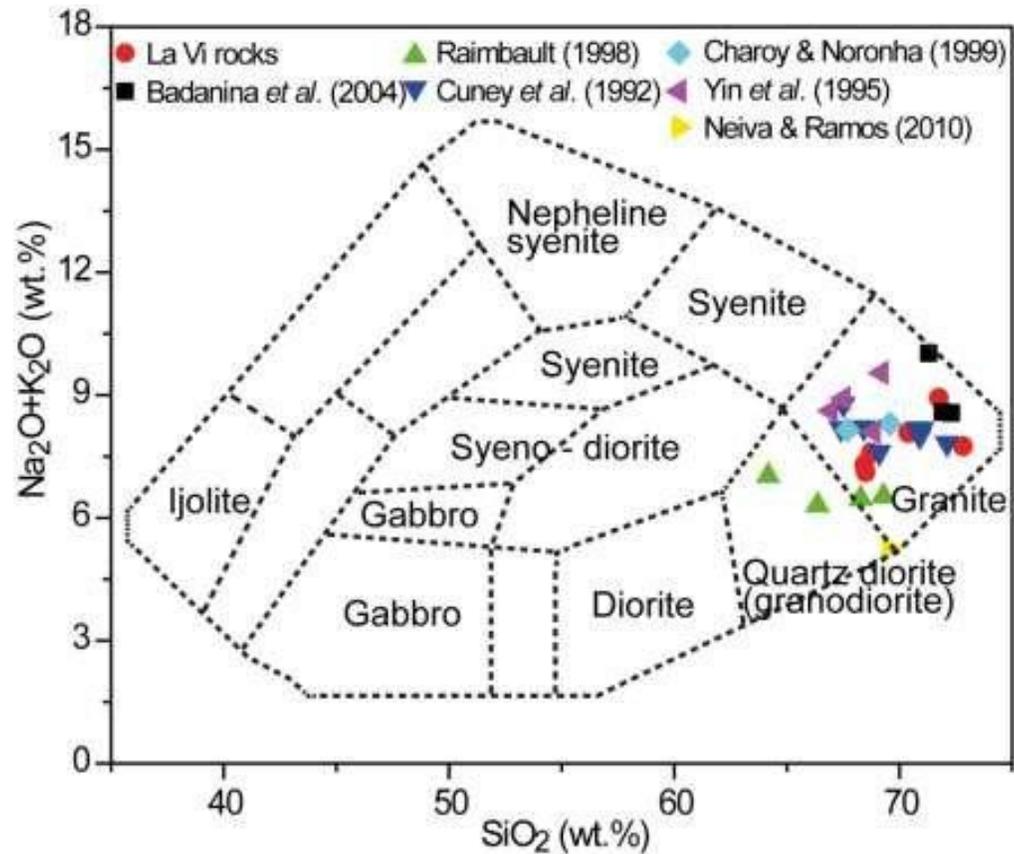
| Sudivisión de los campos coloreados | Traquibasalto | Traquiandesita basáltica | Traquiandesita |
|-------------------------------------|------------------------|--------------------------|----------------|
| $Na_2O - 2.0 \geq K_2O$ | Hawaiita | Mugarita | Benmoreita |
| $Na_2O - 2.0 \leq K_2O$ | Traquibasalto potásico | Shoshonita | Latita |

¿Siempre coinciden las clasificaciones modales (QAPF) y químicas (TAS)?



Álcalis total vs. Sílice

TAS para ROCAS PLUTÓNICAS (Wilson 1989; Cox et al. 1979)



- ✓ Para rocas frescas.
- ✓ Recálculo a 100 % libre de CO_2 y H_2O (quitar LOI)

Composición normativa

Norma CIPW (Cross, Iddings, Pirsson, Washington)

Asociación hipotética ideal de minerales
que cristalizan en un magma anhidro a baja presión



Se calcula a partir de los análisis químicos.

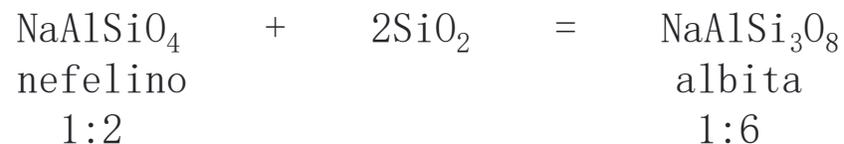
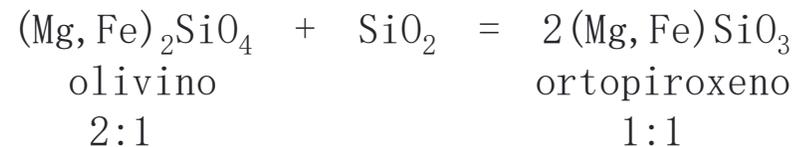


MINERALES NORMATIVOS: *Ol, Q, Ab, An, Hy, Ne, Wo, Di, C y otros*

BENEFICIOS...

- ✓ Permite clasificar. Por ejemplo, basaltos en los que las soluciones sólidas minerales hacen variar la composición de roca total.
- ✓ Permite la comparación de rocas con mineralogía hidratada vs. anhidra, y rocas afaníticas con faneríticas.
- ✓ Permite una fácil comparación entre rocas afaníticas y vítreas.
- ✓ Permiten definir excesos de alúmina o álcalis.

- La norma CIPW se calcula a partir de una rígida serie de pasos y coloca a los diferentes óxidos en un set de diferentes soluciones sólidas y miembros finales.
- Numerosos programas existen para realizar este cálculo.
- La norma simplifica y organiza la composición de una roca. Enfatiza la concentración de sílice respecto de otros óxidos \Rightarrow asigna SiO_2 primero a los feldespatos, luego piroxenos y finalmente al cuarzo.
- Las cantidades relativas se comparan sobre base molar, no en % en peso. Estos se relacionan a las variaciones de la razón de SiO_2 a $\text{MgO}+\text{FeO}$ y de SiO_2 a Na_2O , como se ve más abajo. Se aplica como un modelo para un magma en cristalización.



APPENDIX B



Calculation of the CIPW Norm

In this normative calculation, devised by W. Cross, J. P. Iddings, L. V. Pirsson, and H. S. Washington, constituents from the chemical analysis of a rock are allocated in a prescribed sequence to hypothetical normative minerals. These have simple end-member compositions and all are volatile-free.

The normative minerals and their abbreviations, chemical formulas, and formula weights are shown in Table B.1. Examples of the calculation are shown in Tables B.2 and B.3. During the calculation, numbers should be rounded to four significant digits.

The oxidation state of Fe in the chemically analyzed rock can profoundly affect the degree of silica saturation in the norm. Because this degree of silica saturation is one of the primary reasons for making the

Table B.1. Data for normative minerals

| NAME | ABBREVIATION | CHEMICAL FORMULA | FORMULA WEIGHT |
|------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Quartz | <i>Q</i> | SiO ₂ | 60.08 |
| Corundum | <i>C</i> | Al ₂ O ₃ | 102.0 |
| Orthoclase | <i>Or</i> | K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ | 556.6 |
| Albite | <i>Ab</i> | Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ | 524.4 |
| Anorthite | <i>An</i> | Ca ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ | 278.2 |
| Leucite | <i>Lc</i> | K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 4SiO ₂ | 436.5 |
| Nepheline | <i>Ne</i> | Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ | 284.1 |
| Kaliophilite | <i>Kp</i> | K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ | 316.3 |
| Acmite | <i>Ac</i> | Na ₂ O · Fe ₂ O ₃ · 4SiO ₂ | 462.0 |
| Sodium metasilicate | <i>Ns</i> | Na ₂ O · SiO ₂ | 122.1 |
| Potassium metasilicate | <i>Ks</i> | K ₂ O · SiO ₂ | 154.3 |
| Wollastonite | <i>Wo</i> | CaO · SiO ₂ | 116.2 |

Best

Winter

Appendix The CIPW Norm

As discussed in Section 8.4, the norm is a method of recalculating a chemical analysis of an igneous rock into a set of ideal minerals (Table A-1). The norm was originally proposed as a method of classifying igneous rocks, but the classification has since given way to the direct chemical classifications presented in Chapter 2. The norm is still used by some petrologists, and is most useful for volcanic or glassy rocks, where the modal mineralogy is unavailable. In the United States we commonly use the formulation developed by Cross, Iddings, Pirsson and Washington (the "CIPW" norm), which expresses the "normative" minerals as *weight*

The norm calculation creates ideal minerals by allocating the various chemical constituents in an analysis to a set of prescribed minerals (Table A-1).

Because the volatile constituents are rarely analyzed, the norm is based on *anhydrous* minerals, so that norms cannot be equivalent to corresponding modes for rocks that contain micas or amphiboles. Norms also account for solid solution in minerals, but only in a cursory fashion. As an example of what a norm does, consider the constituent K₂O. In most igneous rocks, potassium is concentrated in orthoclase, KAlSi₃O₈, at least if we are forced to ignore hydrous micas and amphiboles. Each

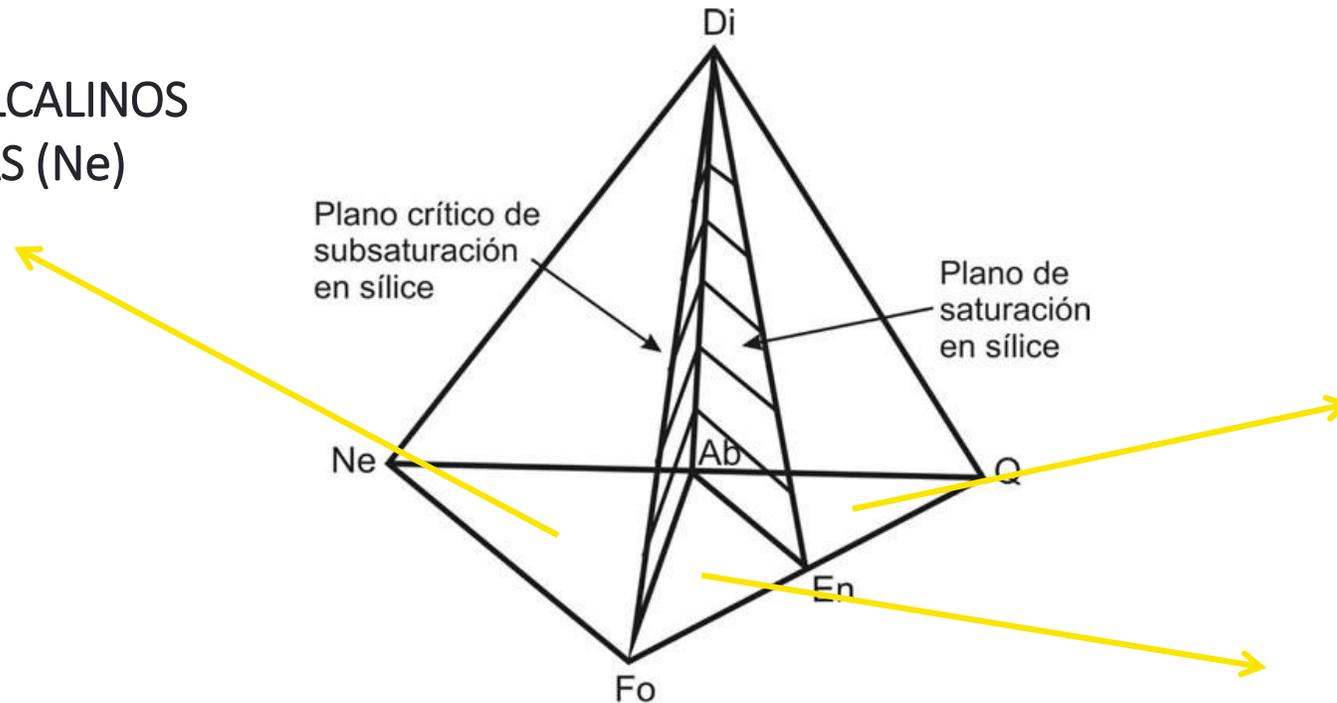
Tetraedro de Basaltos

(Yoder & Tilley, 1962)

Ne-fo-q-di-ab-en

- *Plano Di-Ab-En*: plano crítico de saturación en sílice (hacia la izquierda el olivino es estable).
- *Plano Di-Ab-Fo*: plano crítico de subsaturación en sílice (hacia la izquierda, la nefelina es estable).

BASALTOS ALCALINOS
BASANITAS (Ne)

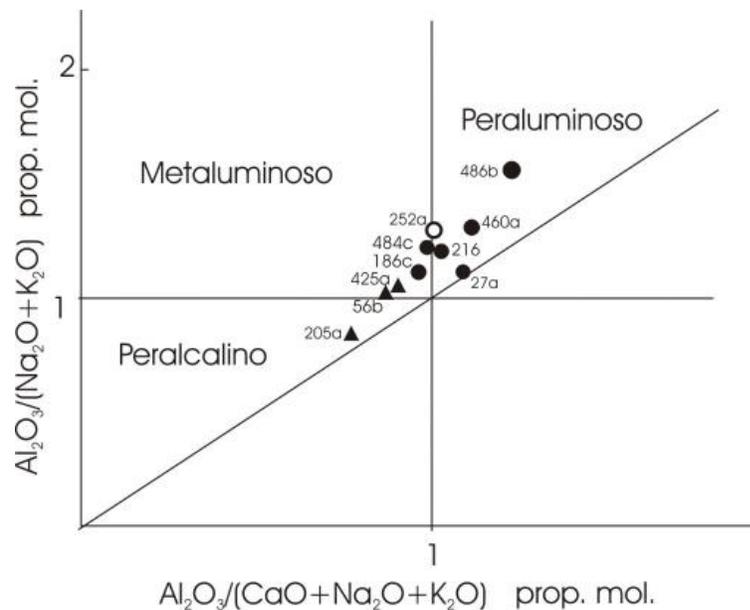


BASALTOS TOLEÍTICOS
CON CUARZO (Hy)

BASALTOS TOLEÍTICOS
CON OLIVINO (Ol)

❖ Grado de saturación en alúmina

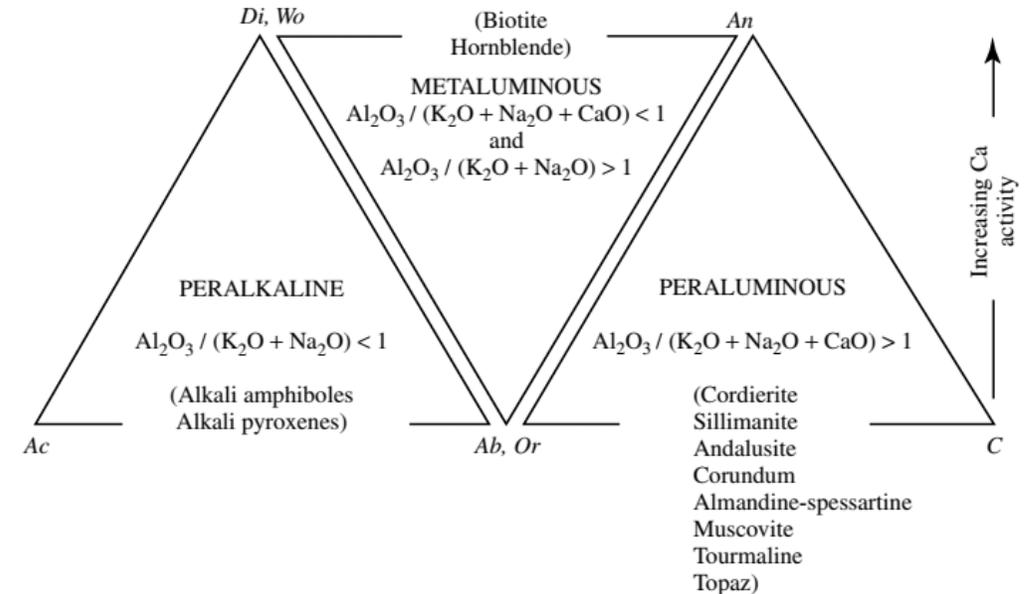
- Al_2O_3 es el segundo óxido más abundante en las rocas ígneas.
- Está frecuentemente contenido en los feldespatos.
- Al_2O_3 en exceso o deficiencia al que es necesario para formar feldespatos mide el nivel de saturación en alúmina.
- Los excesos en alúmina y sus déficits (excesos de álcalis) se acomodan en minerales accesorios.
- También se manifiesta en minerales normativos.



Índice de saturación en alúmina o índice de Shand

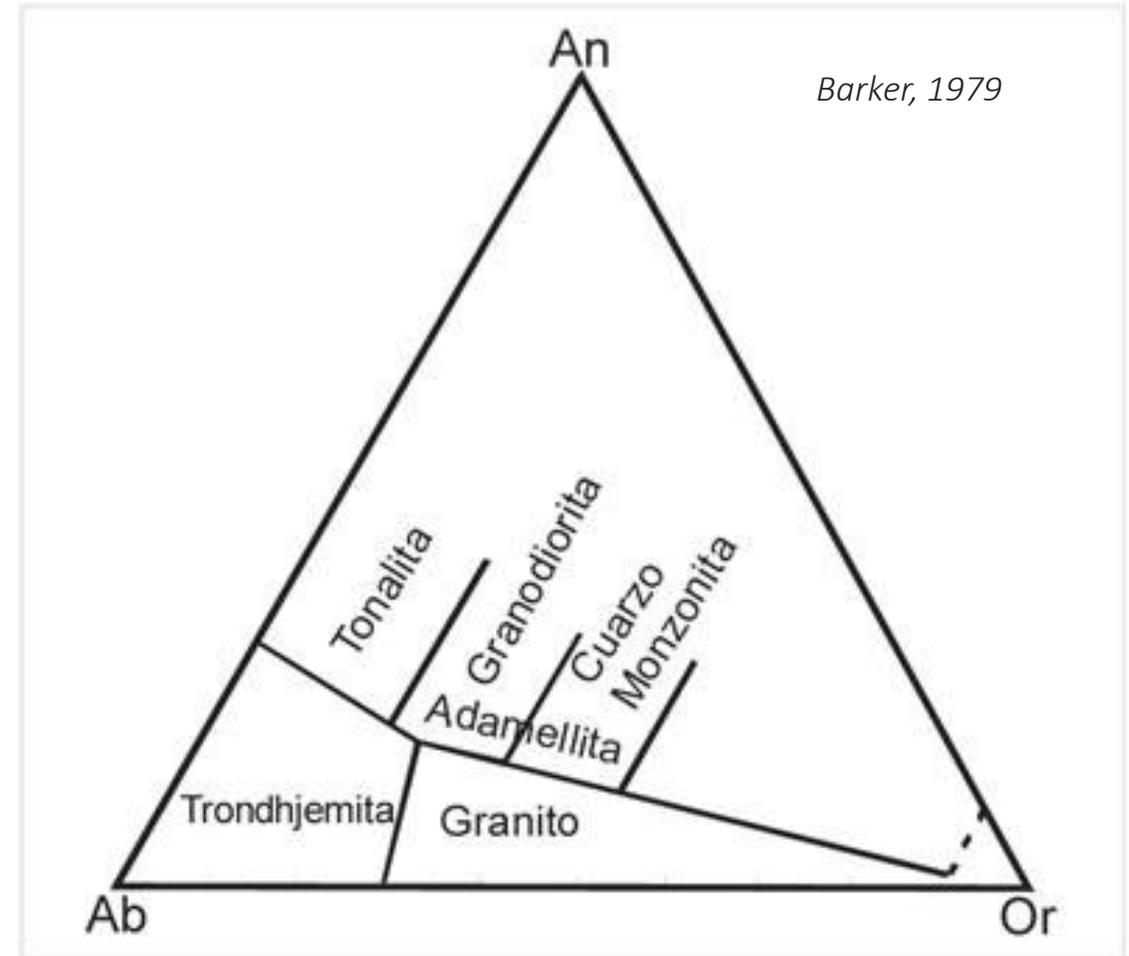
$$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$$

(en base molar)



❖ Clasificación de granitoides según la norma

- ✓ Ab – An - Or normativos.
- ✓ Para rocas félsicas con $Q_{norm} > 10\%$.
- ✓ Feldespatos norm recalculados a 100%.
- ✓ Para rocas plutónicas granitoides.
- ✓ Se puede usar para rocas metamorfizadas y deformadas, a fin de definir el magma original.



❖ Clasificación catiónica

Se transforma el % en peso del óxido a su proporción catiónica

Uno de los mejores diagramas para

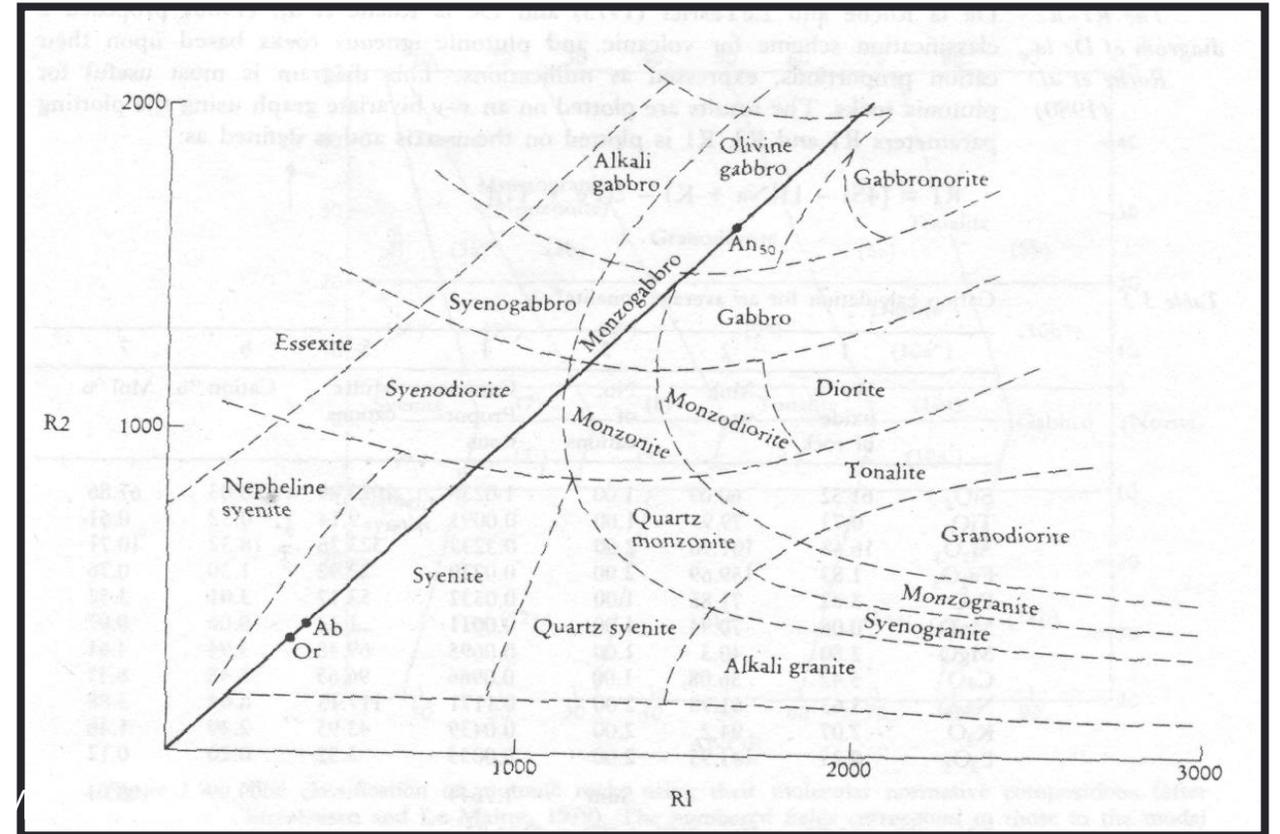
ROCAS PLUTÓNICAS

✓ Se usan muchos elementos: Precisa

Diagrama R1 – R2
(de la Roche et al., 1980)

$$R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$$

$$R2 = 6Ca + 2Mg + Al$$

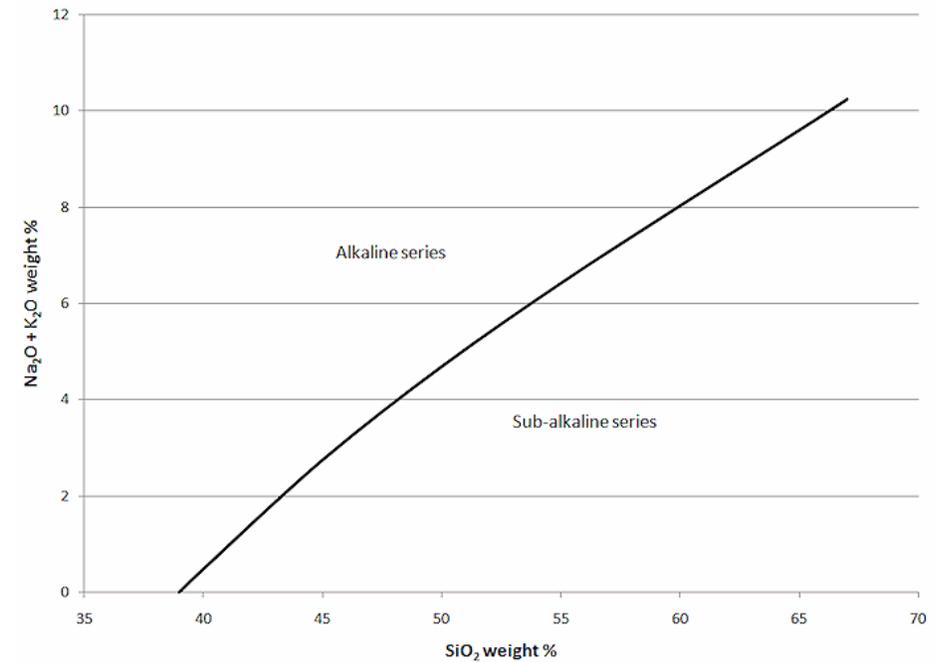


Series de rocas

Grupos de rocas composicionalmente relacionadas

- a) Ocurren en áreas geográficas particulares.
- b) Se simplifican en los siguientes grupos de rocas:
 1. Serie de rocas alcalinas
 2. Serie de rocas subalcalinas
 - i. Serie toleítica
 - ii. Serie calcoalcalina
 3. Serie shoshonítica

La línea define el límite de las rocas Ne-normativas

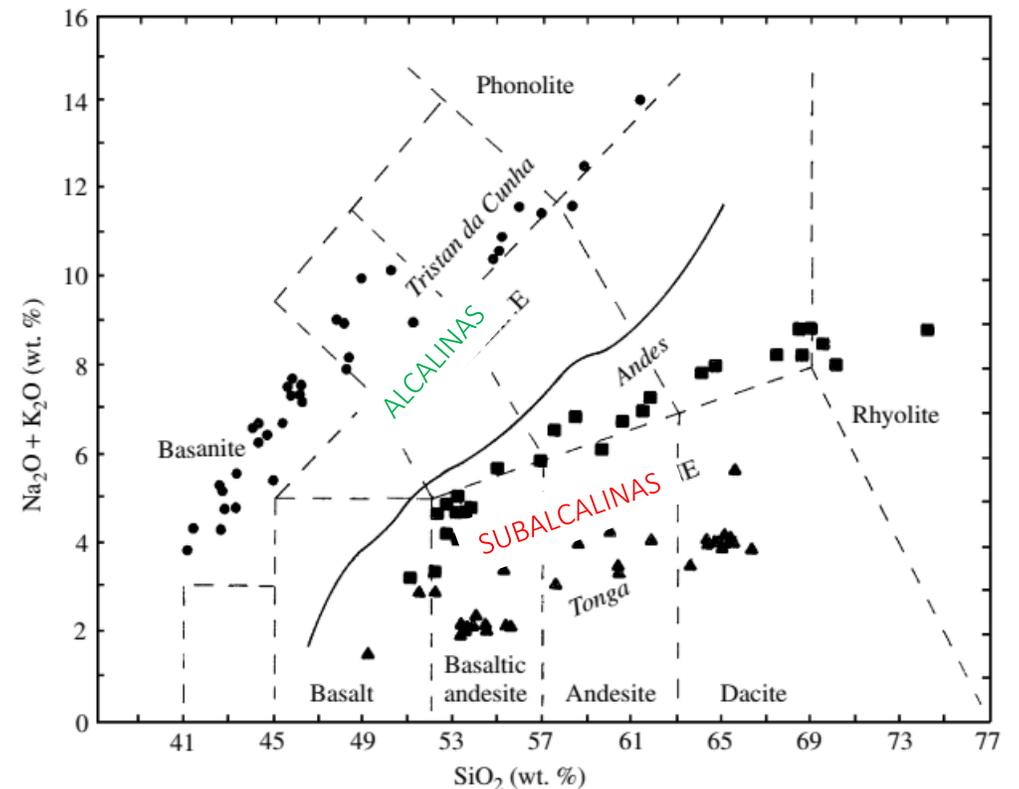


Serie Alcalina vs. Subalcalina (Irvine y Baragar, 1971)

SERIE DE LAS ROCAS ALCALINAS

- Exceso relativo de álcalis vs sílice (no establecido).
- Son subsaturadas en sílice (N_e normativas).
- Muchas presentan minerales como: analcima, feldespatos alcalinos, leucita, nefelina, egirina, riebeckita, afverdsonita, flogopita.
- Se dividen en *sódicas* y *potásicas*.

- Están representadas en rocas de los rifts continentales, en algunas plataformas basálticas, en muchas islas oceánicas y ocasionalmente en arcos insulares.



Serie Alcalina vs. Subalcalina en diagrama TAS.

SERIE DE LAS ROCAS SUBALCALINAS

- Rocas saturadas a sobresaturadas en sílice (*Hy* normativas).
- Nunca *Ne* normativas.
- Feldespatos, augita, ortopiroxeno, hornblenda, biotita, y olivino o cuarzo.

Subdivisión

SERIE TOLEÍTICA

Existe un enriquecimiento en Fe respecto del Mg.

Poca variación en el contenido de sílice ($\text{SiO}_2 < 52\%$).

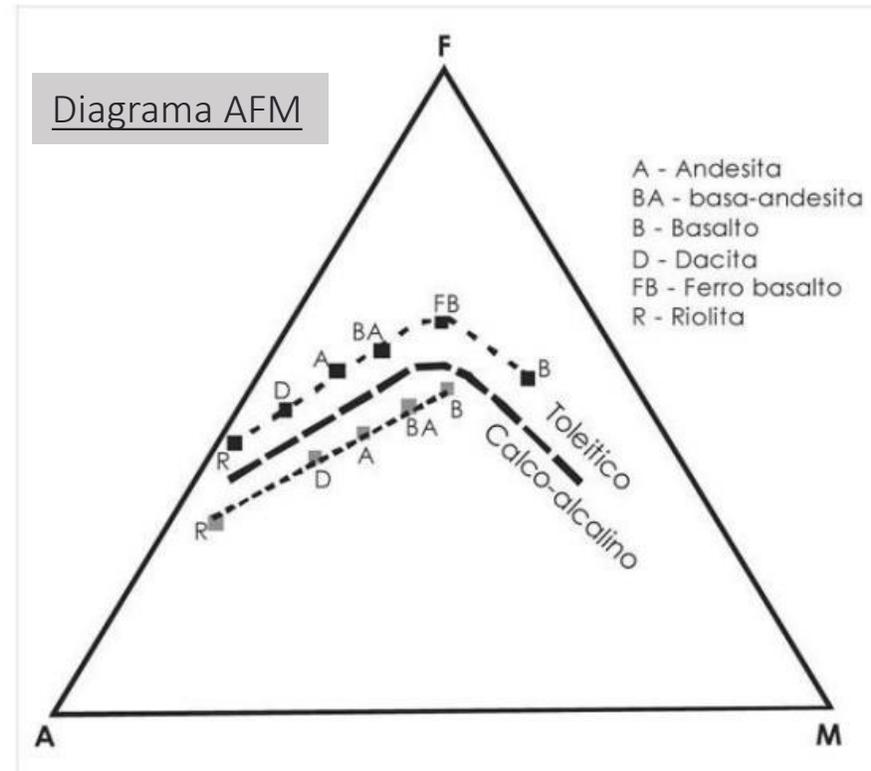
Basaltos de las dorsales meso-oceánicas, basaltos de rifts maduros, existen basaltos toleíticos en los continentes (plateau de inundación).

SERIE CALCOALCALINA

Gran variación en sílice (56-75 %) y álcalis. Abundante alúmina (14-17 %).

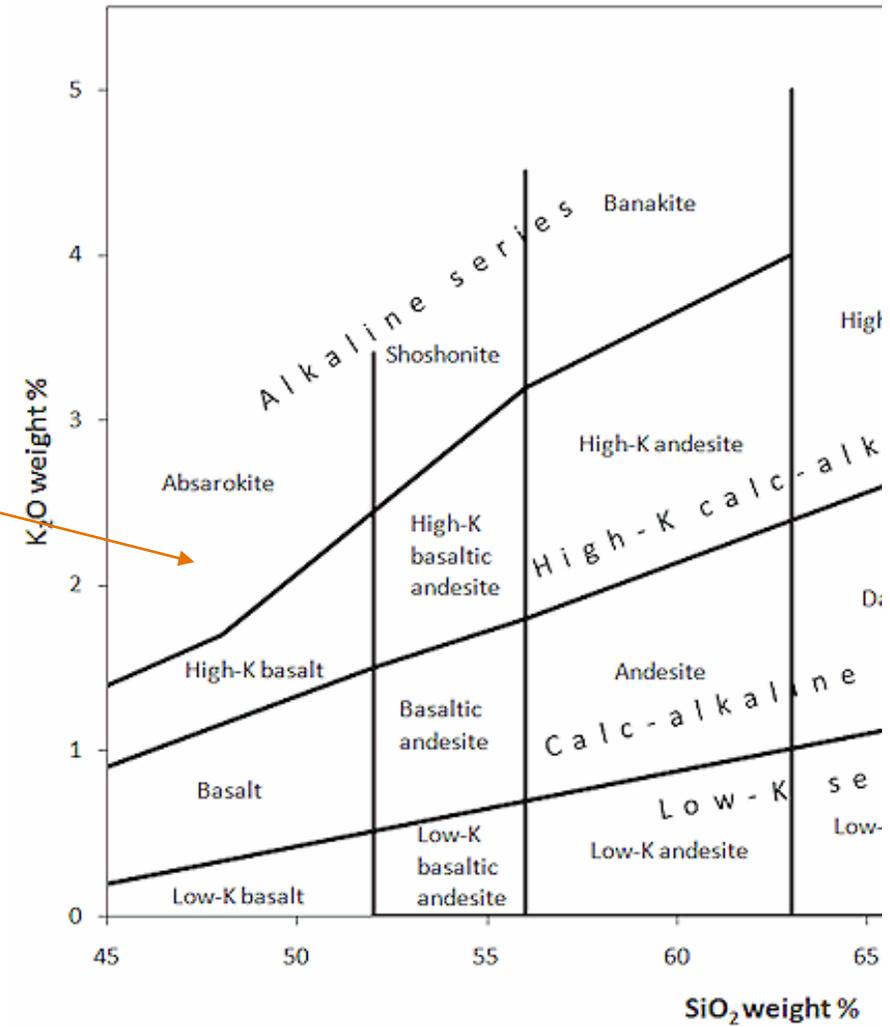
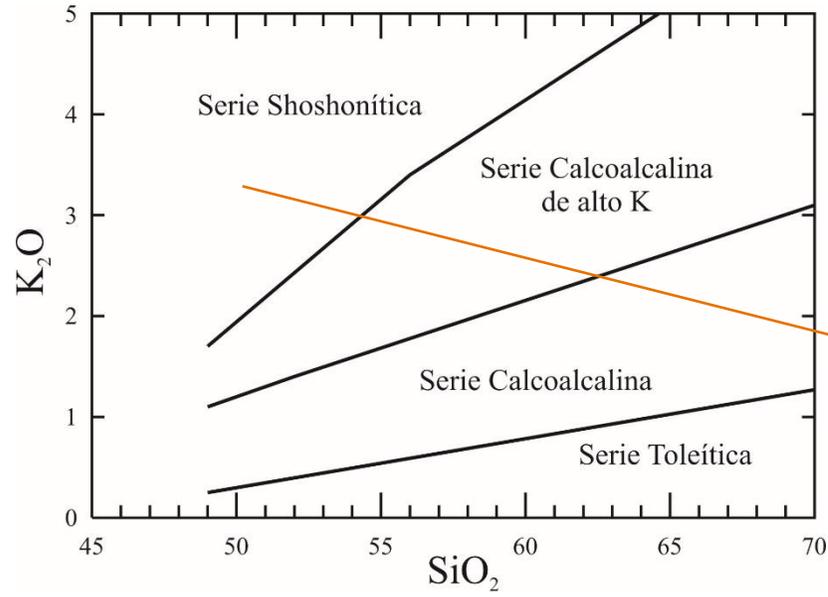
Relación MgO/FeO constante a lo largo de toda la serie

Márgenes continentales activos y arcos de islas.



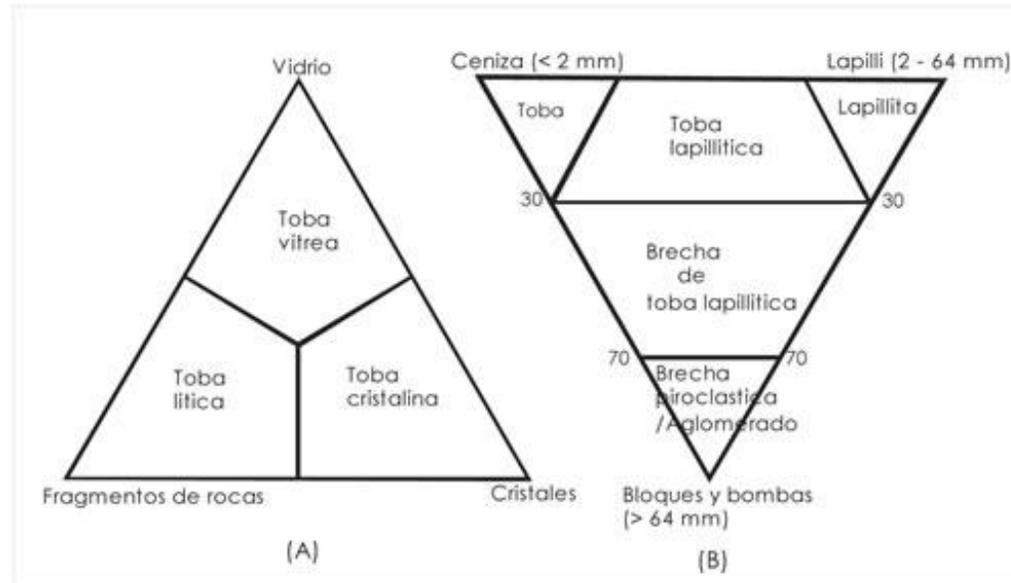
Miyashiro (1974)

Serie absarokita-shoshonita-banakita



❖ Clasificación de rocas piroclásticas

- Pueden ser clasificadas como otras rocas volcánicas mediante el análisis químico bajo ciertas condiciones.
- La mayoría se clasifica de acuerdo a la proporción entre los distintos tipos de piroclastos o al tamaño de dichos fragmentos.



(A) Pettijhon (1975) Sedimentary rocks,
(B) Harper y Row y Shmidt (1981), Geology.

(B) Fisher (1966) Earth Sciences Reviews, 1, 287-298.

3. Criterios empleados para la clasificación de las rocas ígneas.

Según:

- I. Relación de campo, lugar de emplazamiento.
- II. Textura en muestra de mano
- III. Índice de color de la roca
- IV. Análisis modal: Minerales esenciales presentes en la roca
 - *Es el método apropiado para rocas de grano grueso (faneríticas).*
- V. Análisis químico: composición de elementos mayores
 - *Es el método apropiado para rocas de grano fino (afaníticas).*

**VENTAJAS Y
DESVENTAJAS**

Clasificación de las rocas ígneas por sus minerales presentes (composición modal)



Clasificación modal de campo para rocas volcánicas

| Nombre | Mineral esencial | Otros minerales (pueden o no estar presentes) |
|----------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| Basalto | Olivino | Cpx, Opx, Pl |
| Basanita | Olivino + Feldespatoide | Cpx, Pl |
| Andesita | No Olivino, Plagioclasa abundante | Cpx, Hbl, Opx |
| Traquita | Sanidina + Plagioclasa | Na-Cpx, Hbl, Bt |
| Dacita | Plagioclasa, Hornblenda | Cpx, Opx, Bt |
| Riolita | Cuarzo | San, Bt, Pl, Hbl, Cpx, Opx |

Todas estas rocas presentan variables proporciones de vidrio

¡En verdad, la clasificación de una roca ígnea es UN PROCESO!

Exige pasos subsecuentes...

- ✓ Clasifico en el campo por color, por textura.
- ✓ Con la muestra de mano tomada en las rocas plutónicas ya puedo realizar la clasificación modal, que es la más importante.
- ✓ Con las rocas volcánicas necesito sí o sí de los siguientes pasos:
 - Microscopio óptico de polarización(1): cortes delgados + clasificación modal
 - Laboratorio: análisis químicos

¡¡¡¡¡La clasificación puede cambiar a medida que progresamos en el conocimiento de la roca!!!!

La clasificación de una roca ígnea

Lleva consigo una información muy importante sobre la historia de la roca

- * ¿Cómo se crea un rango de composiciones de rocas tan grande y continuo?
- * ¿Puede producirse ese rango de composiciones por procesos asociados a la generación de magmas a partir de la fusión de una fuente de roca?
- * ¿O los magmas generados a partir de roca sólida tienen una composición más restringida pero posteriormente se diversifican de alguna manera?
- * ¿¿Por qué, por ejemplo, no hay rocas magmáticas que contengan 95 % en peso de SiO_2 o 50 % en peso de álcalis totales?



Estas preguntas abordaremos la próxima clase.

CONTINUARÁ...

Bibliografía recomendada para esta clase

- * Best: capítulo 2.
- * Winter: capítulo 2.

