



# Caracterización mineralógica de suelos de la amazonía ecuatoriana, implicaciones para el manejo de suelos y cultivos.

*Markus Gräfe<sup>1\*</sup>, Alexis Debut<sup>2</sup>, Lenin Ron<sup>3</sup>, Alejandra E. Díaz<sup>4</sup>, Cristian J. Apolo<sup>4</sup>, Eduardo J. Sánchez<sup>4</sup>, Gabriela S. Pitizaca<sup>4</sup>, Patricia E. Jiménez<sup>4</sup>, and Diana K. Valverde<sup>4</sup>.*

<sup>1</sup>Departamento de Manejo de Suelos y Aguas, Estación Experimental Santa Catalina, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Cutulaghua (Mejía) - Ecuador.

<sup>2</sup>Centro de Nanociencia y Nanotecnología (CENCINAT), Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Sangolquí – Ecuador.

<sup>3</sup>Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Central del Ecuador, Quito – Ecuador.

<sup>4</sup>Departamento de Manejo de Suelos y Aguas, Estación Experimental Central de la Amazonía, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Joya de los Sachas - Ecuador.

\* Presenting author

"El suelo y la nutrición de cultivos en Ecuador"

27 Abril, 2017: 12:55 – 13:25

INIAP - Estación Experimental Santa Catalina





Dijkshoorn et al 2005. Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; version 2.0). Wageningen: ISRIC - World Soil Information.



La selva amazónica de los Andes ecuatorianos (zona subandina NW del Amazonas) es una de las secciones menos exploradas del Amazonas con respecto a la formación y tipos de suelos que se producen/existen aquí (Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M. & Czimczik, C. I. 2011. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8(6), 1415-1440).

En el año 2016, se han recogido más de 45 muestras de suelo de diferentes horizontes y lugares para entender la variabilidad del suelo en un área de  $\sim 1255 \text{ km}^2$  en la región alrededor de Joya de los Sachas (Orellana - Ecuador).







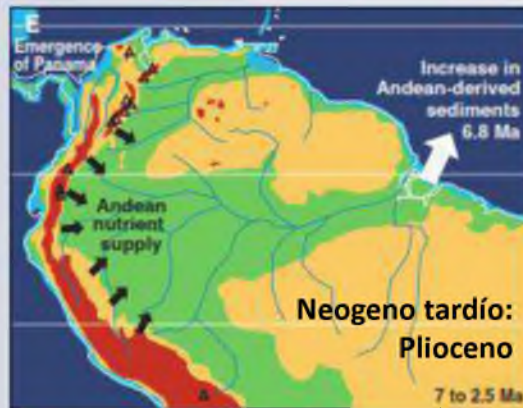
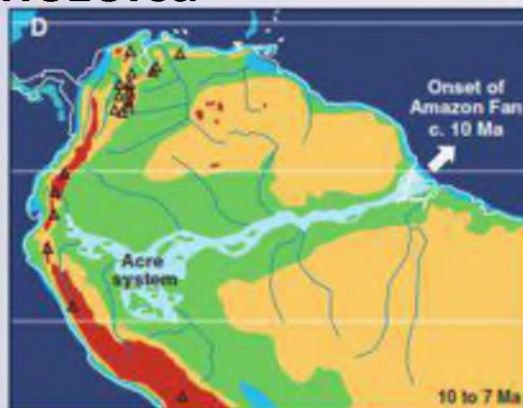
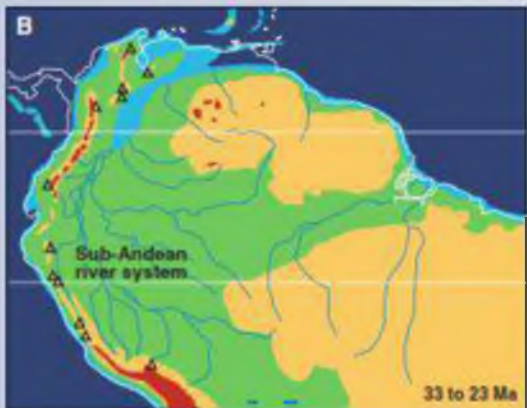
# La Era Cenozoica



Paleogénico  
Paleoceno y  
Eoceno

Paleogénico  
Oligoceno

Neógeno:  
Mioceno  
Temprano



Neógeno:  
Mioceno  
Tardío

- Alpine
- Mountains/hills
- Lowland
- Lake/wetland
- Coastal seas
- Oceanic

Rivers (conjectural)

Apatite fission-track evidence for uplift

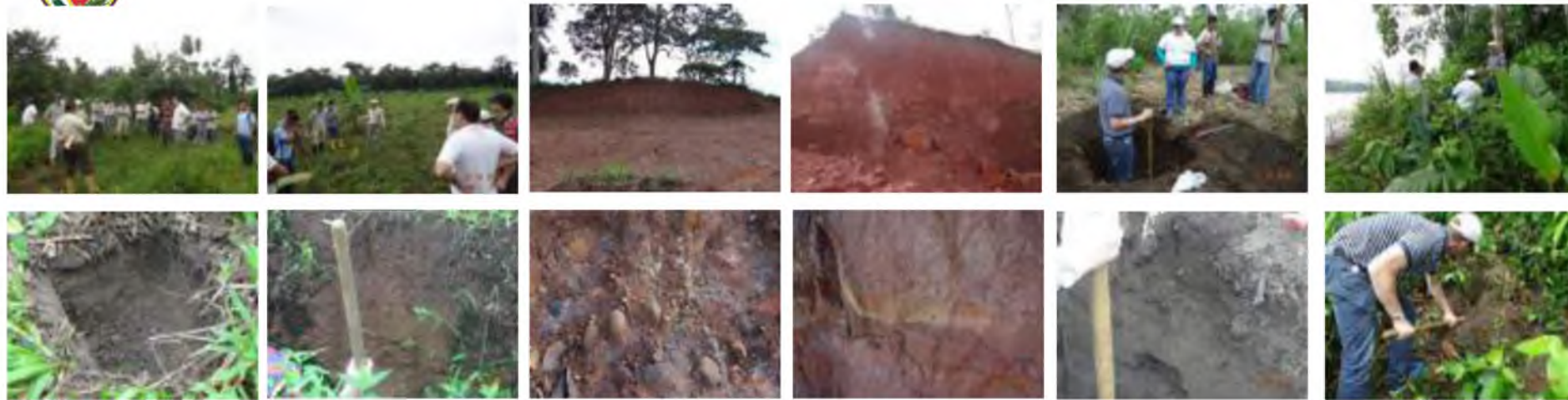
Cuaternario:  
Pleistoceno y  
Holoceno

Modified from: Hoorn, C., Wesselingh, F. P., ter Steege, H., Bermudez, M. A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartin, I., Sanchez-Meseguer, A., Anderson, C. L., Figueiredo, J. P., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F. R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J., Stadler, T., Särkinen, T. & Antonelli, A. 2010. Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. *Science*, 330(6006), 927-931. with permission.

La orogenia andina es el evento más profundo que influyó los suelos, la biodiversidad y el clima en todo el continente americano.







Los Inicios:

¿Cuál es la materia blanca en el centro?

Lo que se cubriéndolo?



# Un vistazo a la diversidad de suelos en la Amazonía ecuatoriana

...



← Muy arcilloso

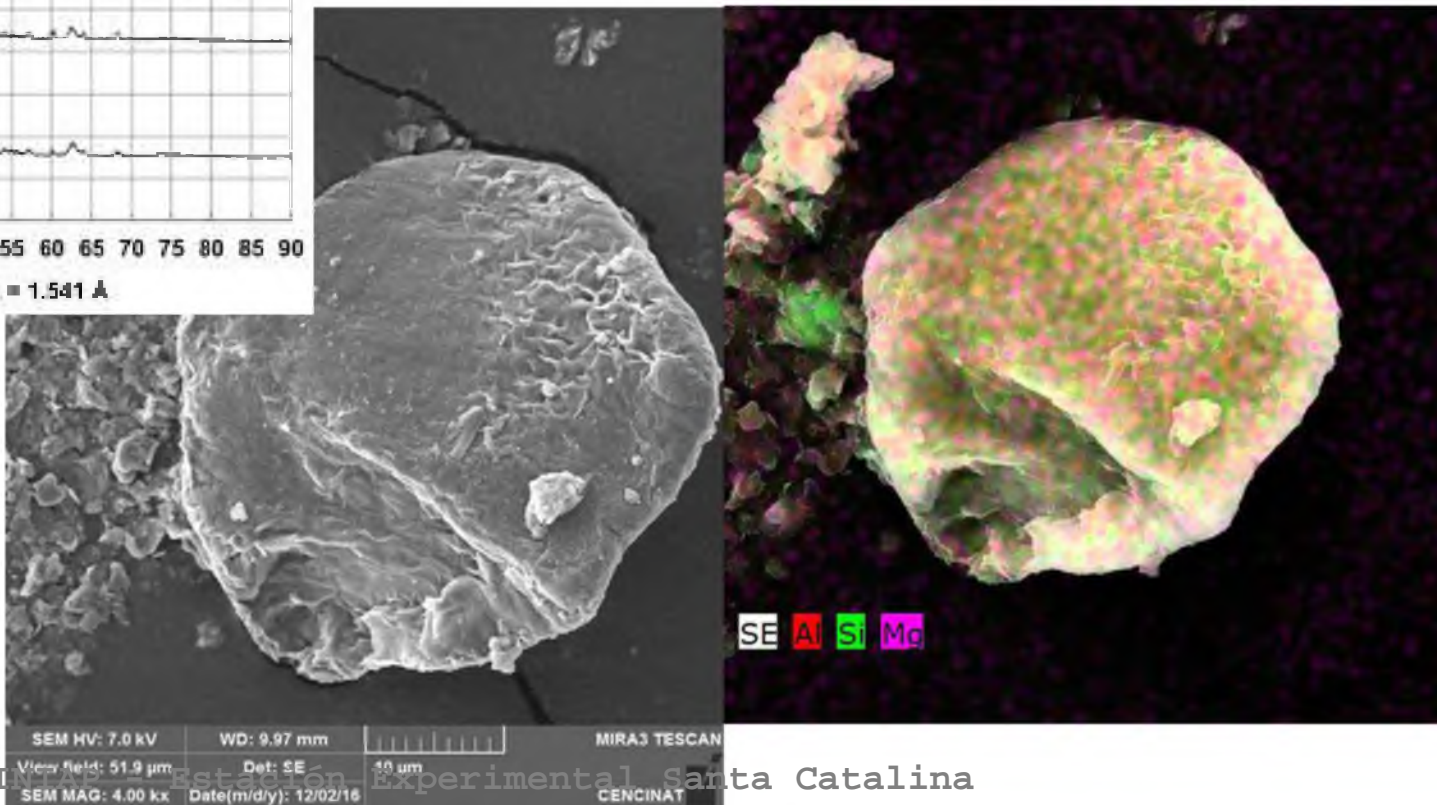
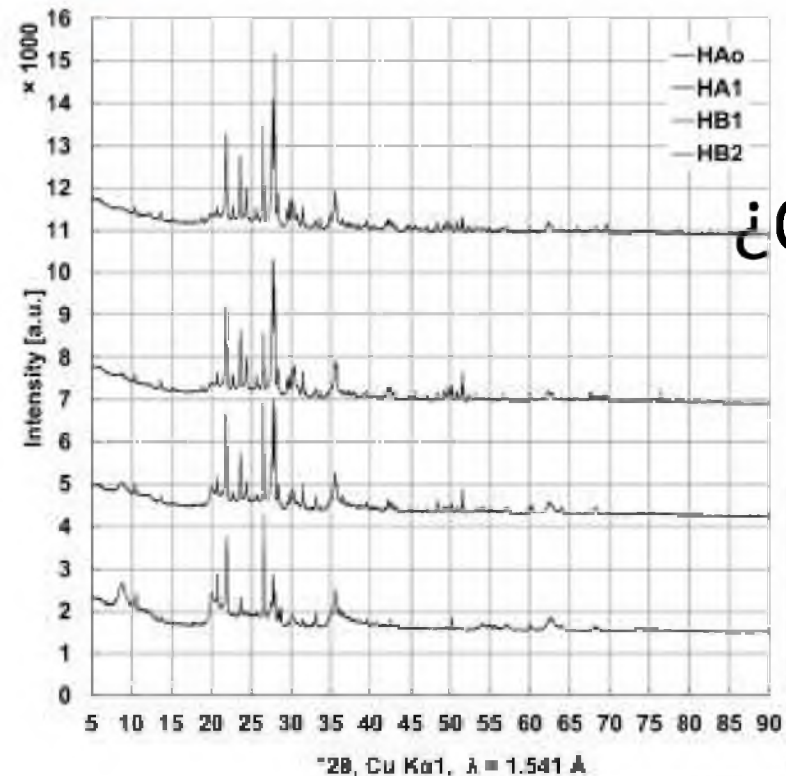
Muy arenoso →  
...ambos cerca al Río Napo





# ¿Porque mineralogía?

## ¿Cómo es útil la mineralogía en el contexto de la agricultura y la producción agrícola?



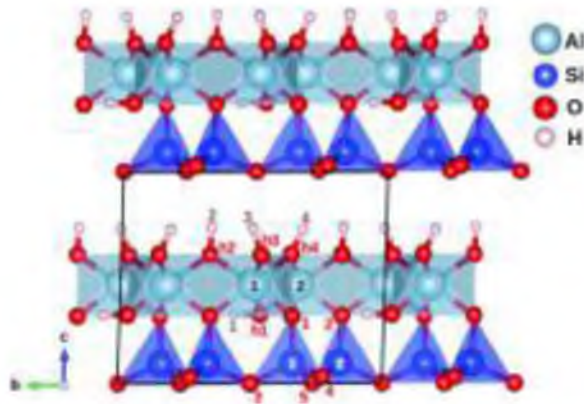




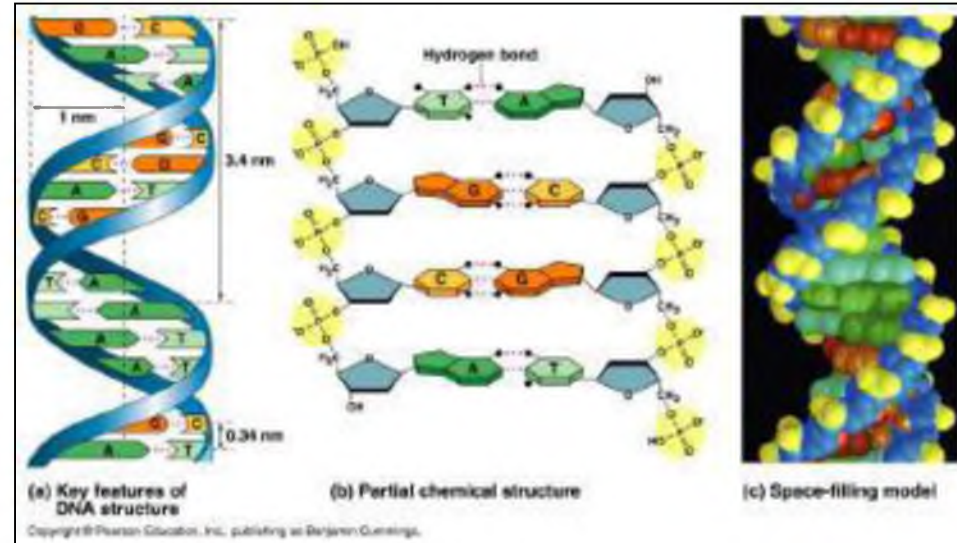
# ¿Porque mineralogía?

## Mineralogía de suelos es parecida a la genética de la biología

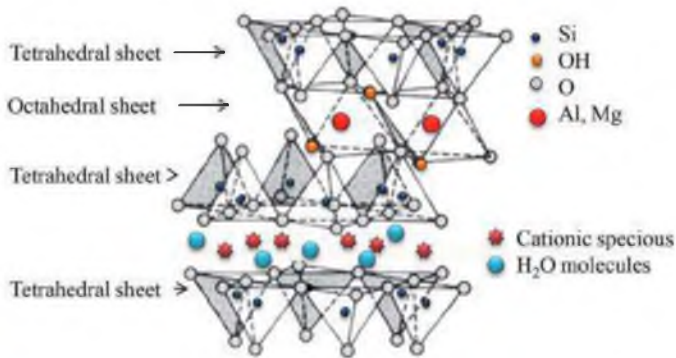
### Caolinita/ halloysita



### Fijación de fósforo, Acidez Residual



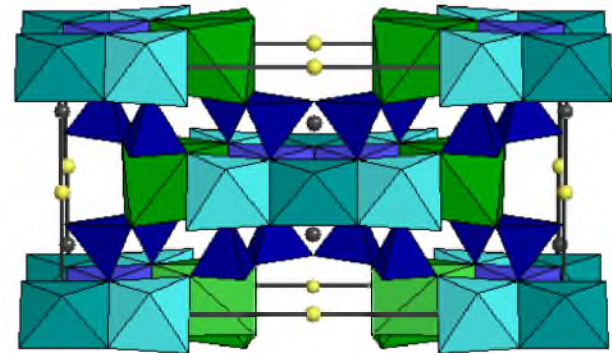
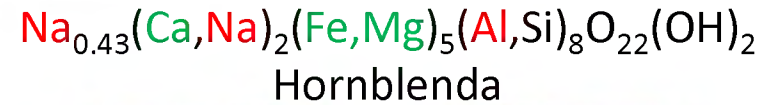
Mica → Illita → Vermiculita → Esmeclita



### Capacidad Intercambio

### Cationico

INIAP - Estación Experimental Santa Catalina



### Fuente de nutrientes

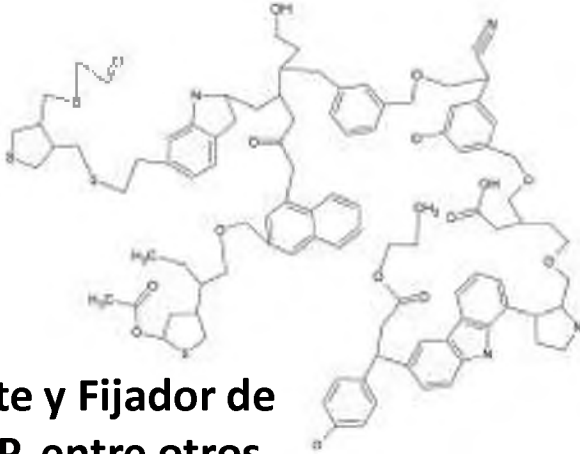
### y amenazas potenciales





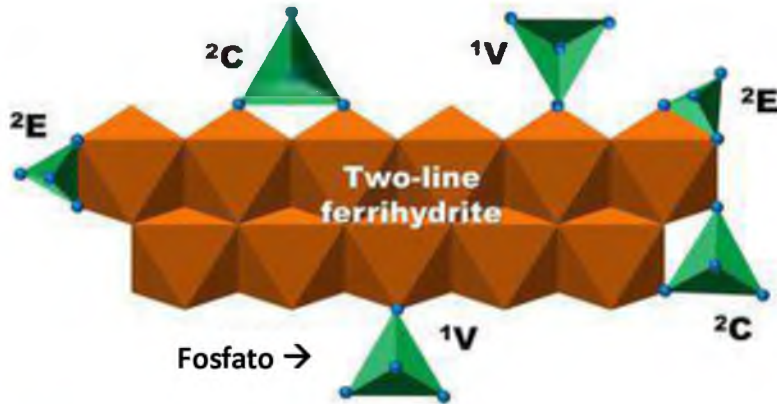
# ¿Porque mineralogía?

Materia Orgánica (M.O.)



Fuente y Fijador de N, S, P, entre otros

Ferrihidrita ( $\sim \text{Fe}_5\text{O}_6(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , *am.*)



Fijación de P  
Estabilizador de M.O.

La mineralogía nos indica:

- Recursos naturales existentes en el suelo
- Beneficios (ej., CIC)
- Problemas Potenciales (Fijación de P; acidez residual, potencial de la compactación y de la erosión)
- El estado de desarrollo del suelo

...y como manejarles para

- **Optimizar** *alimentación* a la planta, la meso- y micro-fauna
- **Evitar & resolver problemas** (acidez, compactación, fijación de P)
- **Minimizar pérdidas** (lixiviación, volatilización, oxidación de M.O.)
- **Ahorrar** agua, insumos, recursos (\$\$\$)







# Enfoque de multiples escalas: Paisaje a Ångstroms



Morfología de Partículas  
Composición de Partículas (EDS)

pH, Al+H, Al, textura



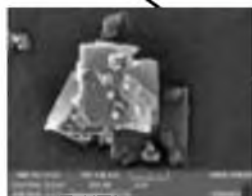
DRX (polvos aleatorios)



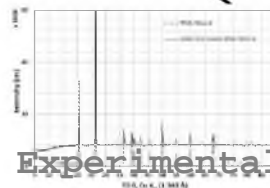
Escala gruesa



Escala micra



Escala Ångstrom





# La Interpretación:

## Escala Matemática/ Estadística

### DRX de polvos aleatorios

- 3 regímenes de muestreo
- Análisis de componentes principales de 16 patrones por régimen de muestreo
- Aislado de los componentes primarios
- Rotación (Gira) Varimax
- Indexación de los picos a fases mineralógicas (70-160 picos por CP)
- Análisis iterativo de los factores objetivos

### Resultados Deseados

- Análisis semi-cuantitativo de la composición mineralógica cristalina.
- Las combinaciones únicas de los minerales.

### Espectrometría dispersiva de electrones (EDS)

- 1165 espectros: 22 elementos químicos
- Análisis de componentes principales de (1165 x 22) combinaciones de elementos químicos
- Aislado de los componentes primarios
- Análisis de Cluster

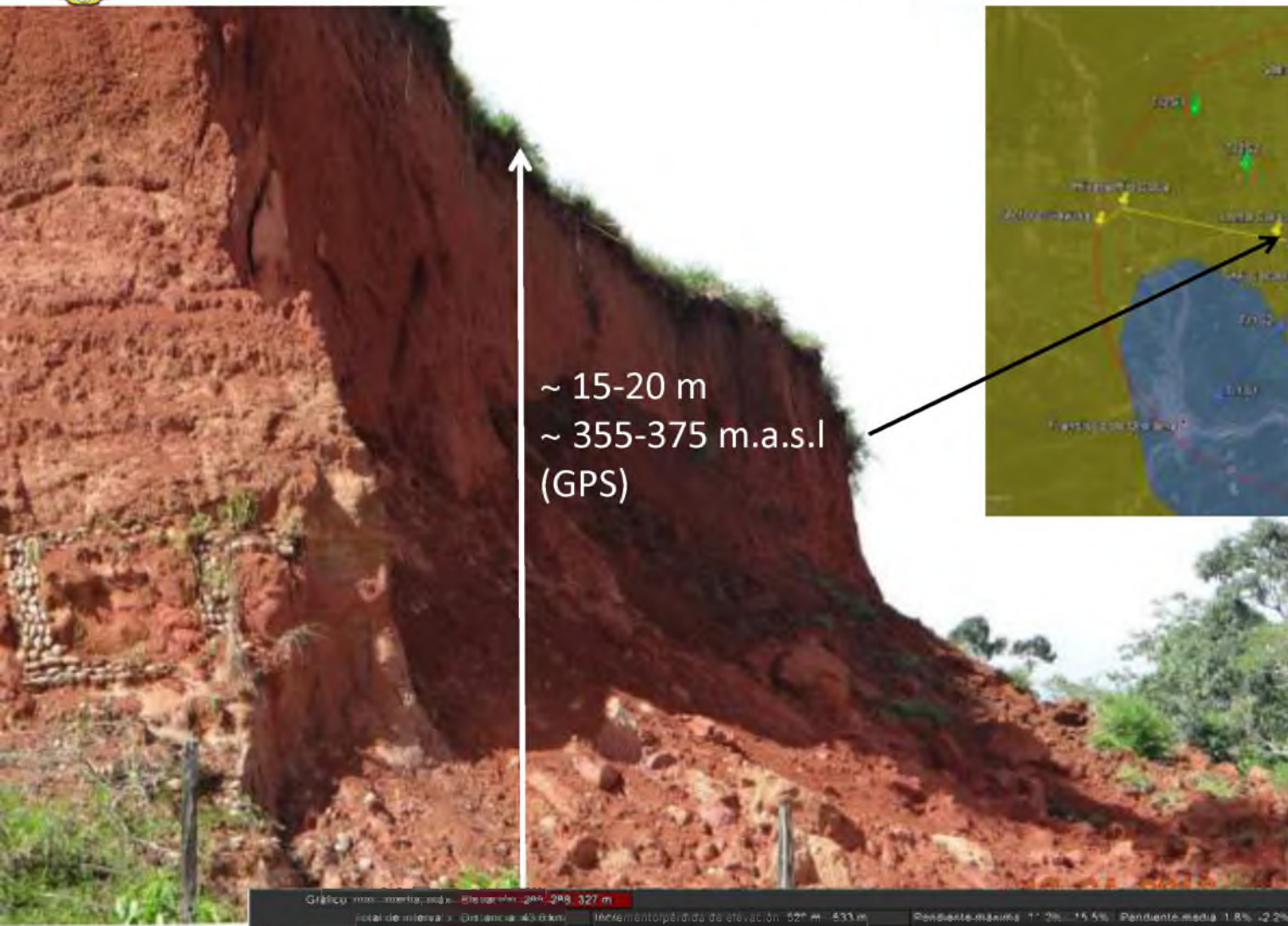
### Resultados Deseados

- Análisis semi-cuantitativo de las combinaciones únicas de los elementos químicos
- Factores de enriquecimiento de nutrientes (P, S, Mg, Ca, etc.) y amenazas potenciales (Cd, As, Pb, etc.)





# Lomas Coloradas



~ 15-20 m  
~ 355-375 m.a.s.l  
(GPS)



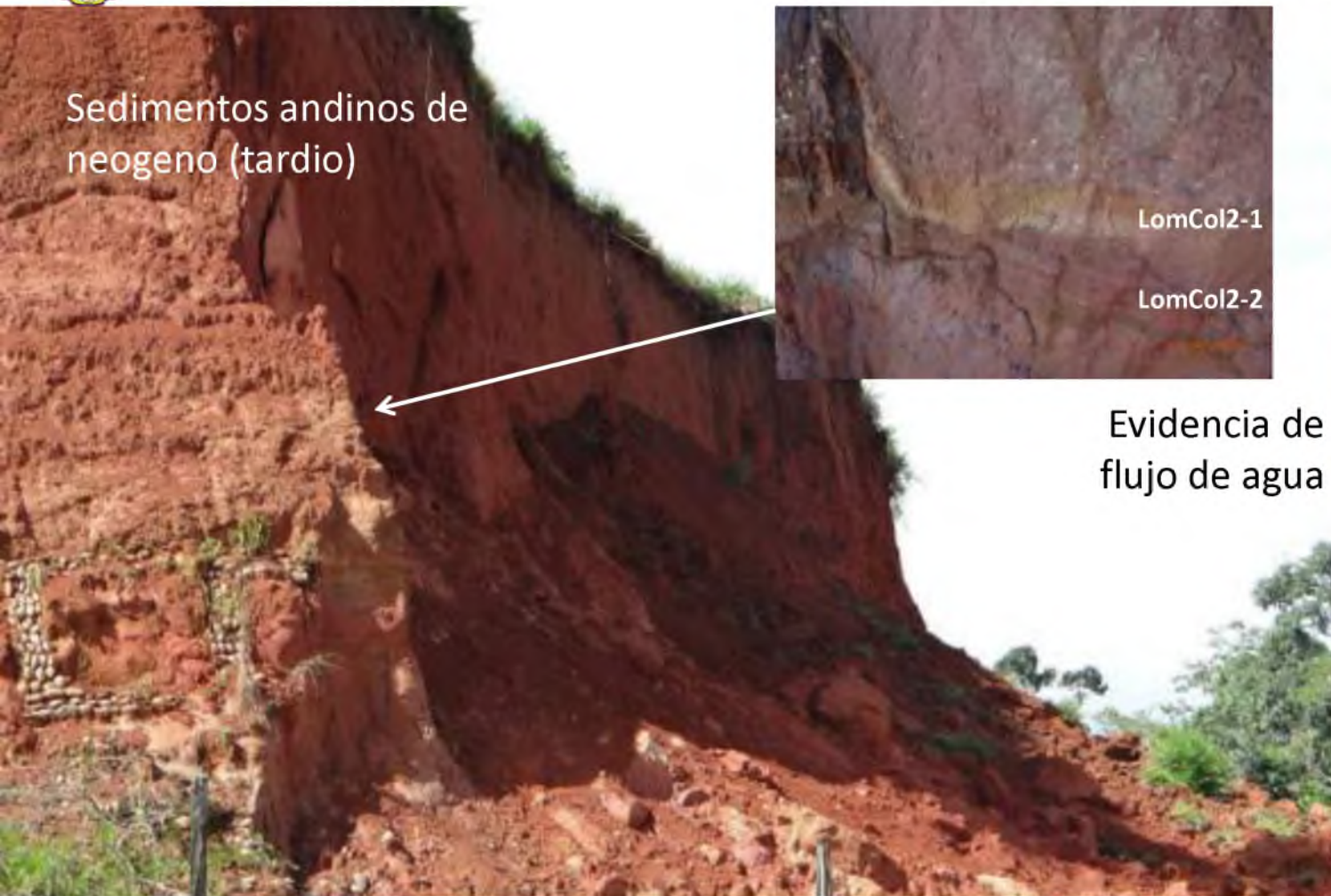




# Lomas Coloradas



Sedimentos andinos de neogeno (tardio)



LomCol2-1

LomCol2-2

Evidencia de flujo de agua



pH/KCl	pH/H2O	Al + H	Al	% OM	Texture
3.74	4.85	3.90	1.32	0.00	clay to silt loam







Altura real desconocida ~ 306  
m.a.s.l (GPS)

plintita, ~ 90 cm

plintita , ~ 200 cm

(petro) plintita, ~ 270 cm

*Las Lomas Coloradas  
muestran evidencia de  
frecuentes ciclos de  
inundación y secado*

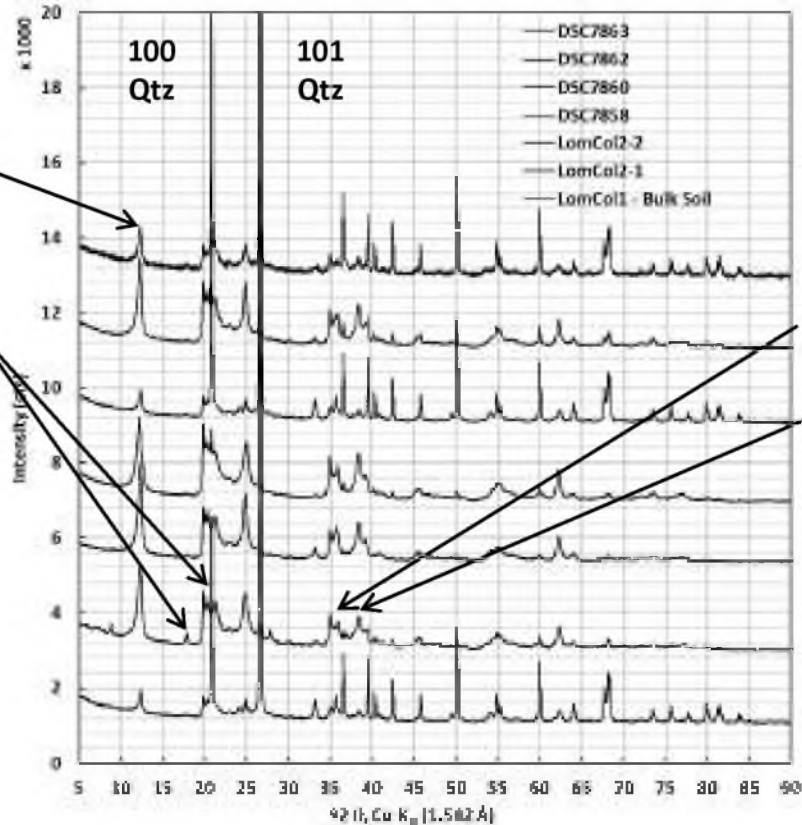
07.09.2016





001  
caolinita  
halloysita

110, 020  
goethita

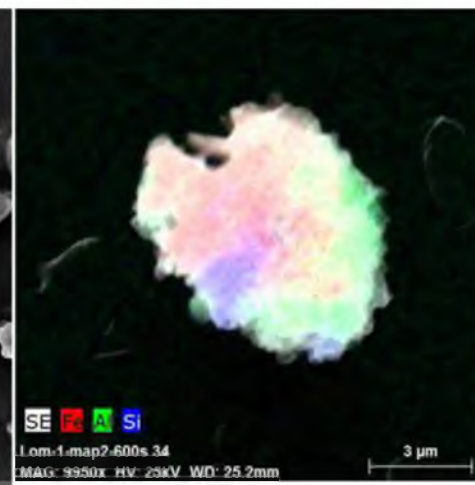
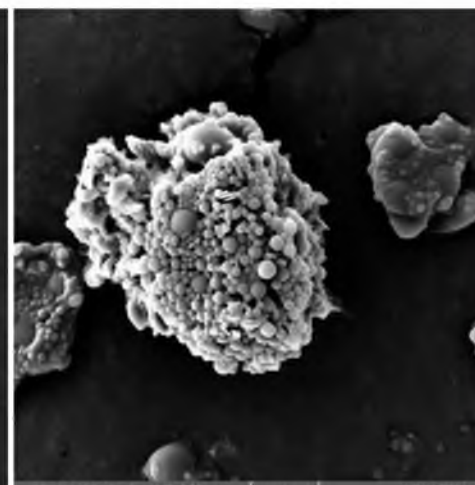
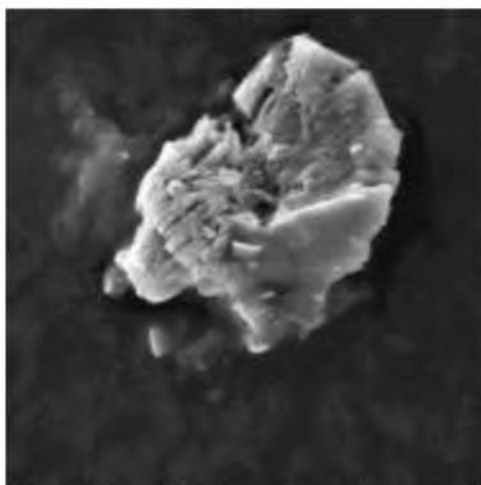


130, 021, 111  
Gt

*El pH bajo de estos suelos retrasa la cristalización de al ferrihidrita a goethita.*

*Mínimos de feldespatos sugieren una meteorización in situ significativa y prolongada (laterización).*

Folletos de caolinita y halloysita esferoidal







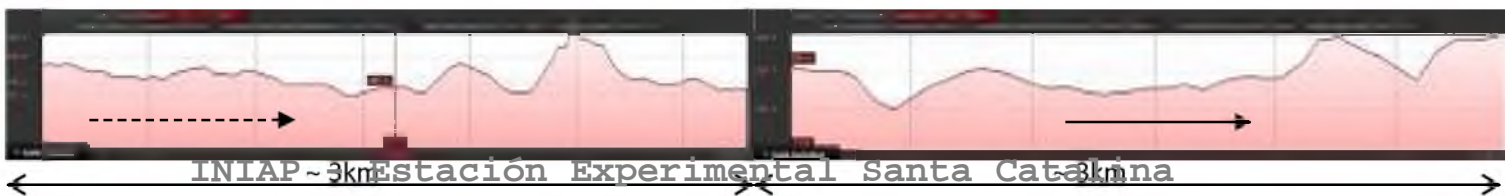
# Terraza Aluvial bajo sistema silvo-pastoril (~ 300 m.a.s.l.)



Vista Aérea de la Parroquia Enokanqui

## Leyenda

- Ruta de Muestreo Aleatoria 1
- VM: Finca Vilma Mesa







# Terraza Aluvial bajo sistema silvo-pastoril (~ 300 m.a.s.l.)

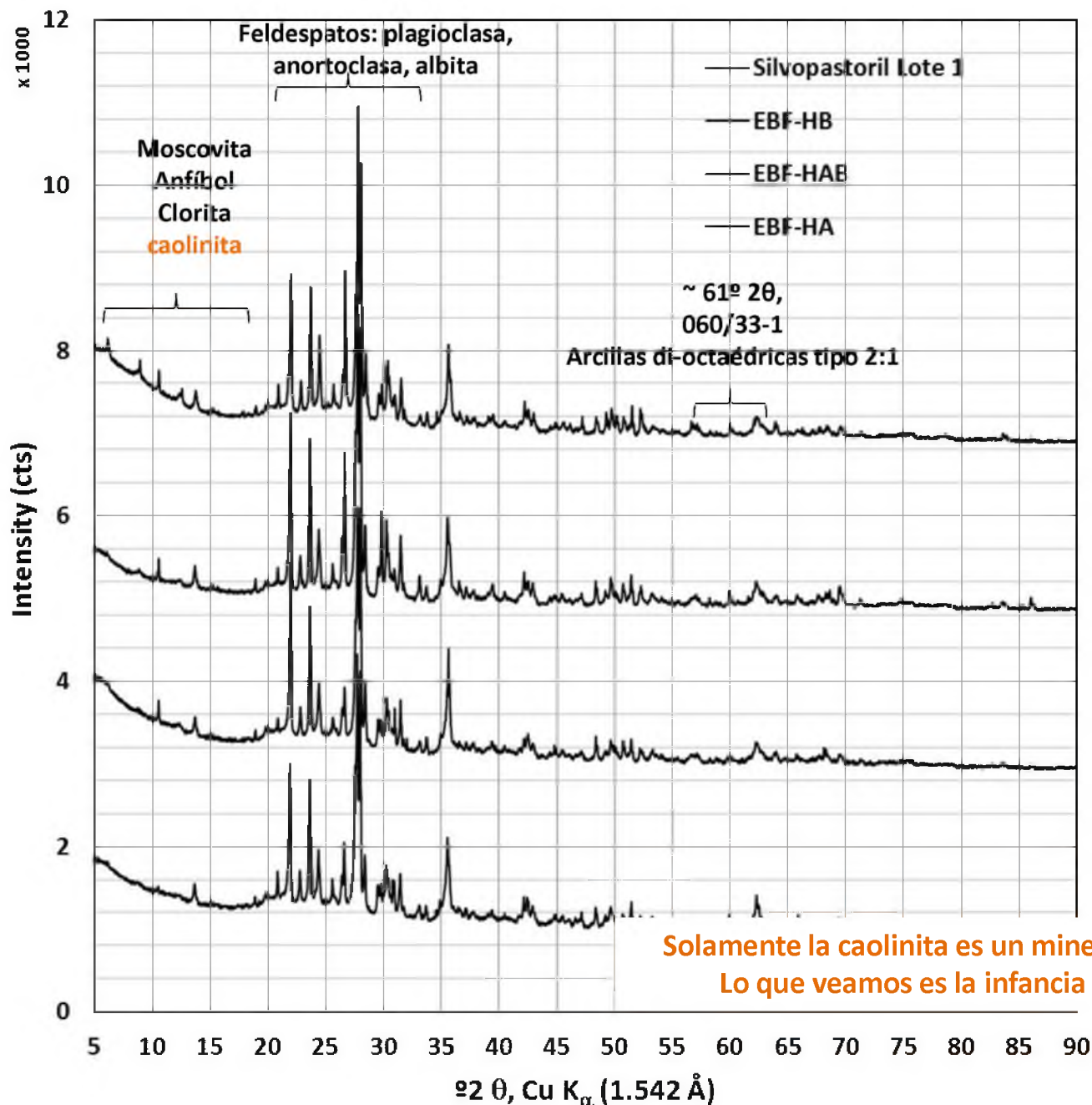


Sedimentos Andinos (Holoceno)

SL = Franco Arenoso  
 LS = Arena franca  
 S = Arenoso

ID & Location	Land Use	Altitude (m.a.s.l)	Horizon	Depth (cm)	Munsell Colour (Hue/Chroma)	pH DDI-H <sub>2</sub> O	pH (1M KCl)	Al + H <sup>a</sup>	Al	% OM	Texture <sup>b</sup>
<b>Parroquia Enokanqui</b>											
Finca Wilma Mesa 0° 12' 44.535" S 70° 52' 28.169" W	Forage Bank for Livestock	290	A	0-10	5.6	4.6	0.7	0	7.2	SL	
			AB	10-17	6.1	4.9	0.3	0	2.6	LS	
			B	> 17	6.5	5.1	0.8	0	0.4	S	
Finca Wilma Mesa 0° 12' 44.535" S 70° 52' 28.169" W	Silvipasture	290	A	0-12	6.6	5.3	0.5	0	0.8	S	





**Solamente la caolinita es un mineral secundario:  
Lo que vemos es la infancia del suelo...**







# Conclusión Preliminar



De forma aislada, resultados de cada sitio tienen poco significado, sino podemos identificar lo que une y lo que separa estos suelos.

Entonces, hay que resolver la amplia diversidad por la estadística: **Quimiometría**.

*La Ruta Aleatoria (ruta amarilla), 7 ubicaciones, 16 muestras.*

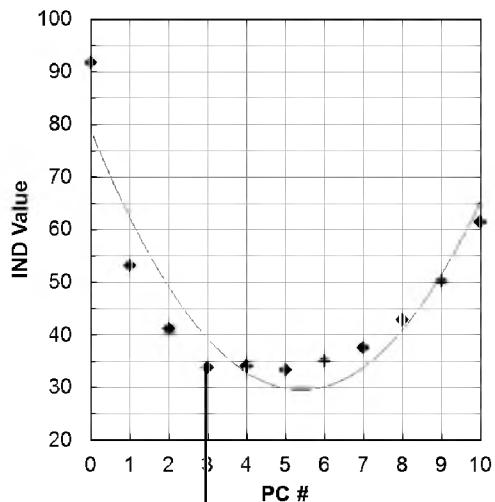




# Análisis de Componentes Principales: Ruta Aleatoria (16)



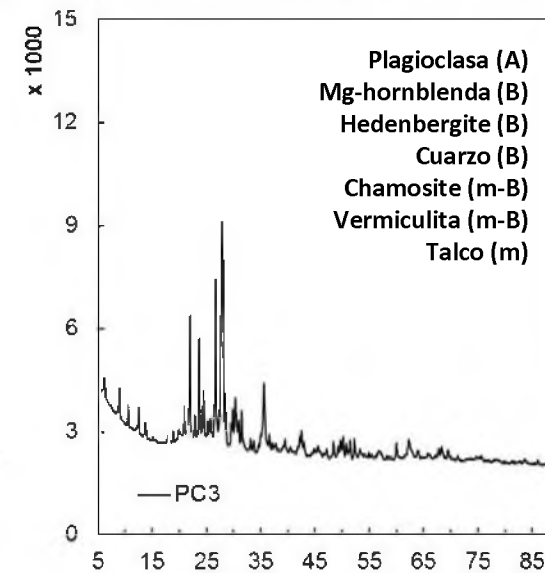
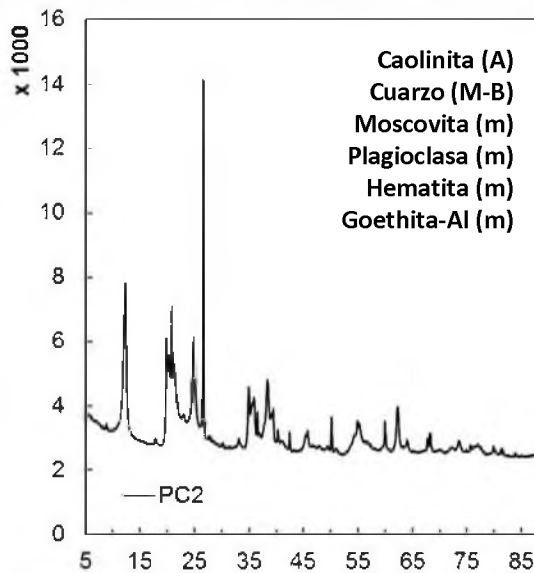
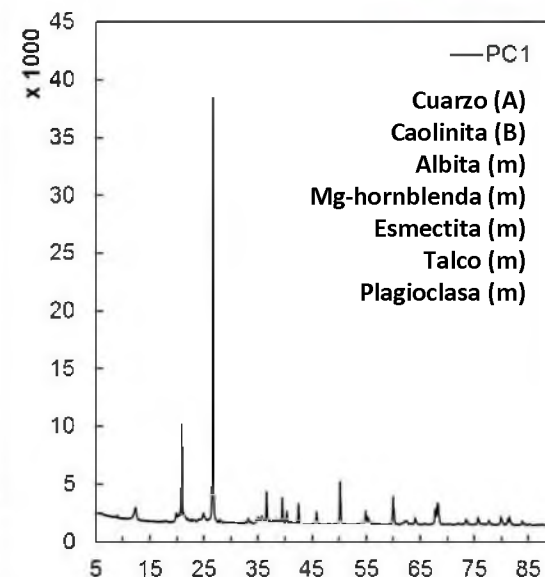
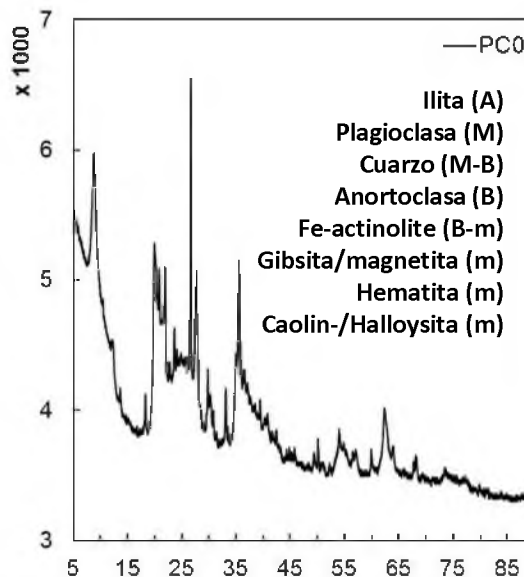
Espacio factorial = 16 x 5000



Valor IND de Malinowski: el primer mínimo indica la separación entre componentes primarios (datos reales) y componentes secundarios (error).

Cantidades aproximadas y relativas

m = mínimo
B = bajo
M = Medio
A = Alto



$2\theta, (Cu K_{\alpha 1})$







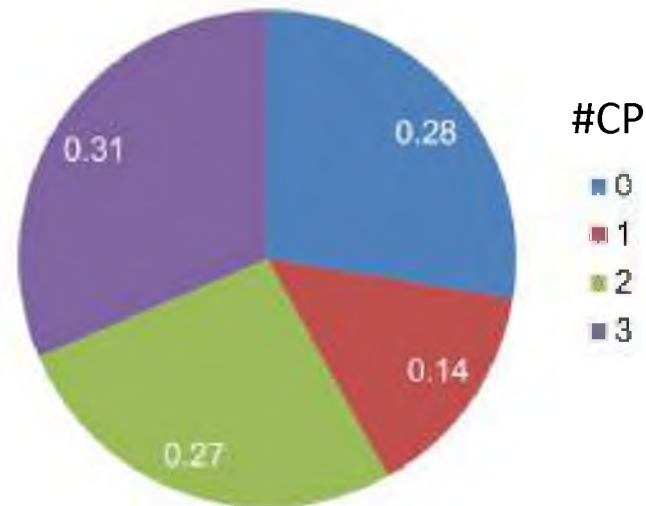
# Análisis iterativo de los factores objetivos: Ruta Aleatoria



Muestra	CP#				SUMA	NSS	NSA
	0	1	2	3			
DSC7858.e	0.06	0.05	0.77	0.06	0.93	0.0026	0.0331
DSC7860.e	0.22	0.73	0.00	0.00	0.96	0.0030	0.0243
DSC7862.e	0.05	0.16	0.74	0.05	1.01	0.0005	0.0128
DSC7863.e	0.04	0.75	0.20	0.03	1.02	0.0021	0.0233
EBF-HA.e	0.13	0.00	0.08	0.78	0.99	0.0037	0.0301
EBF-HAB.e	0.13	0.00	0.07	0.84	1.03	0.0011	0.0199
EBF-HB.e	0.02	0.02	0.06	0.88	0.98	0.0048	0.0471
EBF-Silvopast.e	0.10	0.03	0.02	0.87	1.02	0.0035	0.0310
<b>EECA-Cacao-HB.e</b>	<b>0.84</b>	<b>0.03</b>	<b>0.11</b>	<b>0.07</b>	<b>1.05</b>	<b>0.0004</b>	<b>0.0131</b>
EECA-Cacao-HBC.e	0.77	0.06	0.19	0.00	1.02	0.0011	0.0174
EECA-Silvopast.e	0.71	0.05	0.00	0.23	0.98	0.0017	0.0217
LOMCOL1BS.e	0.00	0.25	0.74	0.07	1.06	0.0033	0.0199
LOMCOL2-1.e	0.10	0.07	0.65	0.12	0.94	0.0021	0.0229
LOMCOL2-2.e	0.29	0.00	0.75	0.00	1.04	0.0026	0.0312
<b>RivRioCoca.e</b>	<b>0.00</b>	<b>0.15</b>	<b>0.00</b>	<b>0.86</b>	<b>1.01</b>	<b>0.0068</b>	<b>0.0427</b>
SAF-CafeCacao.e	0.63	0.08	0.14	0.17	1.01	0.0004	0.0112
SecGuayusa.e	0.59	0.01	0.01	0.31	0.91	0.0043	0.0437
Average	0.28	0.14	0.27	0.31	1.00	0.0026	0.0262
Standard Error	0.07	0.06	0.08	0.09			
95% CI	0.15	0.12	0.16	0.19		0.0009	0.0056

**NSS** = Suma normalizada de errores cuadráticos

**NSA** = Suma normalizada de las diferencias absolutas



ANOVA + Posthoc Bonferroni-Holm Test (p = 0.05):

Group 1	Group 2	Critical	P	Significant?
1	3	0.00833333	0.11479044	No
0	1	0.01	0.16543452	No
1	2	0.0125	0.20857226	No
2	3	0.01666667	0.6841047	No
0	3	0.025	0.73687393	No
0	2	0.05	0.93181176	No





# Implicaciones para el manejo de suelos y cultivos

## Minerales Primarios/ Minerales formadores de rocas



Muestra	Minerales Primarios/ Minerales Formadores de Rocas										
	Feldespatos			Anfibol		Piroxeno	Micáceo				
	Albita	Anortholcase	Plagioclasa	Fe-Actinolita	Mg-hornblenda	Hedenbergite	Moscovita	Ilita	Talco	Chamosita	
Na [AlSi3O8]	(Na,K) [AlSi3O8]	Na0.5Ca0.5K0.03 Al1.5Si2.5O8	(Ca,Fe,Na)2(Mg,Fe)5 (Si,Al)8O22(OH,F,Cl)2	Na0.43(Ca,Na)2(Fe,Mg)5 (Al,Si)8O22(OH)2		CaFeSi2O6	KAl2 [Si3Al]O10(OH)2	K0.88Al2 [Al0.88Si3.12O10](OH)2	Mg3 [Si4O10](OH)2	[Mg2.518Fe2.482] [Al1.25i3.8]O18	
DSC7858.e			m				m				
DSC7860.e	m		m		m				m		
DSC7862.e			m				m				
DSC7863.e	m		m		m				m		
EBF-HA.e			A		B	B			m	m-B	
EBF-HAB.e			A		B	B			m	m-B	
EBF-HB.e			A		B	B			m	m-B	
EBF-Silvopast.e			A		B	B			m	m-B	
EECA-Cacao-HB.e		B	M	B-m				A			
EECA-Cacao-HBC.e		B	M	B-m				A			
EECA-Silvopast.e		B	M	B-m				A			
LOMCOL1BS.e	m		m		m				m		
LOMCOL2-1.e	m		m		m				m		
LOMCOL2-2.e	m		m		m				m		
RivRioCoca.e			A		B	B			m	m-B	
SAF-CafeCacao.e		m	M-A	m	m	m		M-A	m	m	
SecGuayusa.e		m	M-A	m	m	m			m	m	

Caolinita  
Gibbsite  
Silicato am.

**Acidez**  
**Erosión, Compactación**  
**Toxicidad de Al**  
**Fijación P**

Ilita  
Esmectita  
Vermiculita

**Alta CIC**  
**Baja Fijación de P**  
**Ca, Mg, K, Fe**







# Implicaciones para el manejo de suelos y cultivos: Minerales Secundarios



Muestra	Minerales Secundarios							
	Filosilicatos				Oxidos			
	Vermiculita	Esmeclita	Caolinita/ Halloysita	Cuarzo*	Goetita	Hematita	Gibbsita	Magnetita
	[Mg <sub>2.88</sub> Al <sub>0.12</sub> ][Si <sub>2.84</sub> Al <sub>1.16</sub> O <sub>12</sub> ]	(K,Ca,Na)[Al,Fe <sup>2+</sup> ,Mg] <sub>4</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	a-FeOOH	a-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al(OH) <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
DSC7858.e			A	M-B	m	m		
DSC7860.e		m	B	A				
DSC7862.e			A	M-B	m	m		
DSC7863.e		m	B	A				
EBF-HA.e	m-B			B				
EBF-HAB.e	m-B			B				
EBF-HB.e	m-B			B				
EBF-Silvopast.e	m-B			B				
EECA-Cacao-HB.e			m	M-B		m	m	m
EECA-Cacao-HBC.e			m	M-B		m	m	m
EECA-Silvopast.e			m	M-B		m	m	m
LOMCOL1BS.e		m	B	A				
LOMCOL2-1.e		m	B	A				
LOMCOL2-2.e		m	B	A				
RivRioCoca.e	m-B			B				
SAF-CafeCacao.e	m		B	A		m	m	m
SecGuayusa.e	m		B	A		m	m	m

Alta CIC  
 Baja Fijación de P  
 Ca, Mg, K, Fe disponible  
 Alto potencial matricial  
 Contracción-expansión (esmética)  
 Compactación (esmética)  
 Riesgos de salinidad/sodicidad en zonas  
 áridas

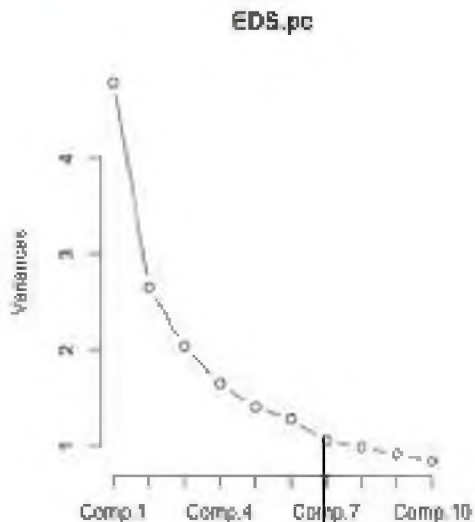
Riesgos	Manejo Sugerido
Acidez	Encalado
Toxicidad de Al	Encalado
Baja CIC	Encalado
Fijación P	Encalado
Erosión, Compactación, Inundación	Agricultura de conservación: Zero labranza, mulch verde, silvicultura
Bajo potencial matricial	↑ M.O.



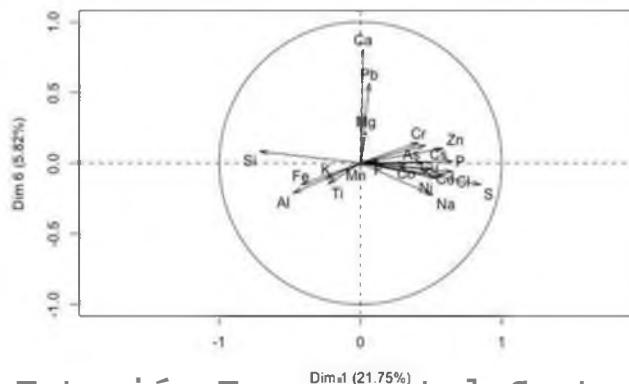
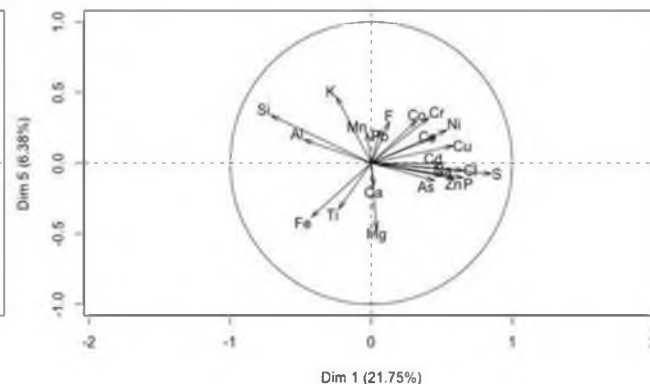
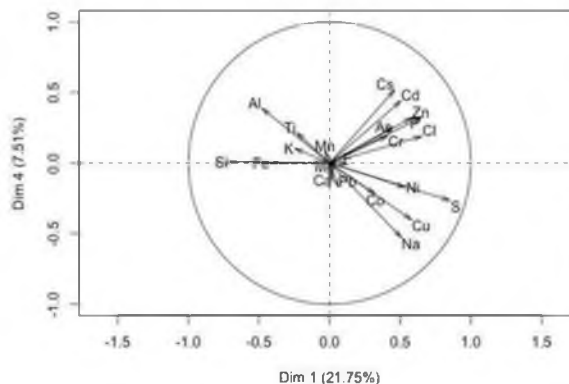
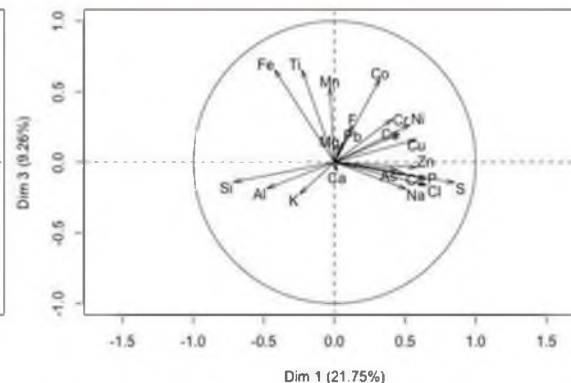
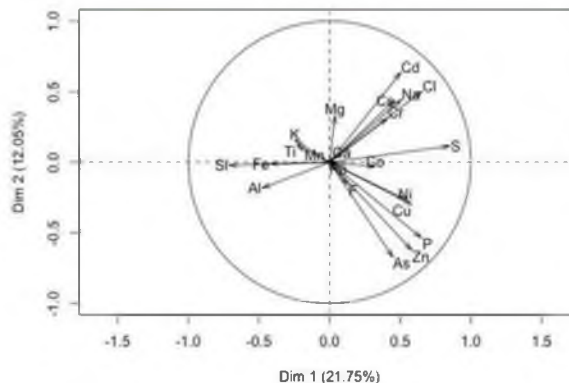


# Análisis de Componentes Principales y de Clusters: EDS

F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Cs, Pb



Comp. 7 es el primer componente del error



Los componentes primarios describen 62.77 % de la variabilidad.

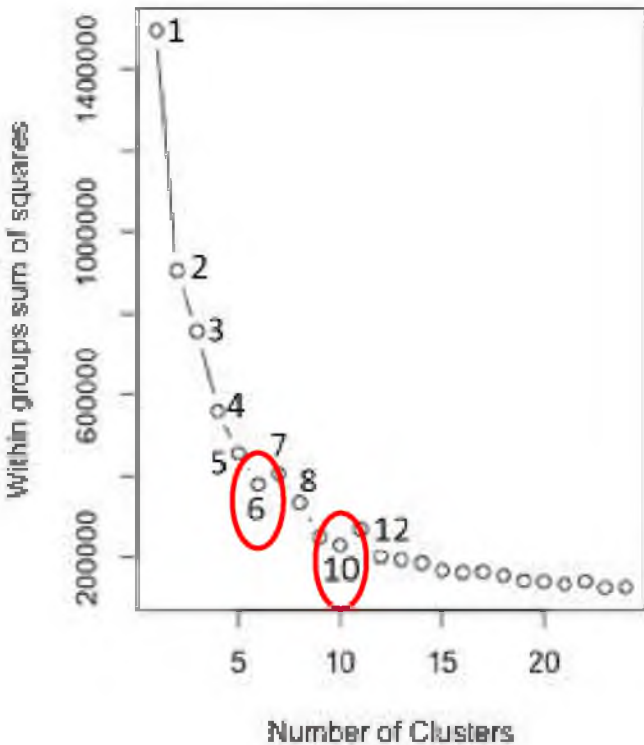




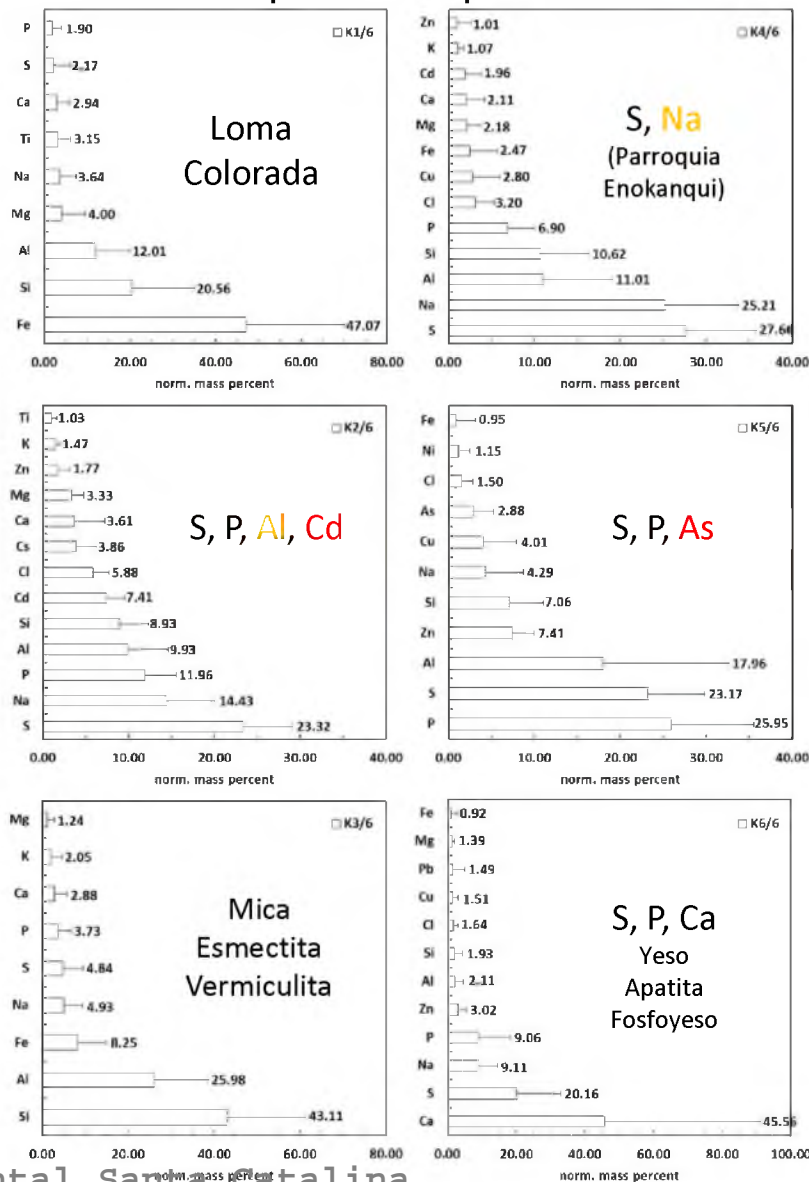


## Análisis de 6 Clusters en base de 6 componentes primarios

Determinación del numero adecuado de clúster



Hay que identificar los suelos con alto contenido de **Cd** y **As** y correlacionar a la mineralogía presente: **cacao** y **arroz**.





Técnicas para disminuir la disponibilidad de Cd en suelos de cacaoteras (UTE-ESPE-INIAP; Drs. Manuel Carillo, Alexis Debut, Markus Gräfe).

Machala, Península Sta. Elena, Esmeraldas, Quevedo, (+ de Amazonia y Sto. Domingo).

Andic Properties of non-volcanic, polygenic soils of the southern central Ecuadorian highlands (IRD-ESPE-INIAP; Drs. Pascal Podwojewski-Theofilus Toulkeridis-Markus Gräfe).

Cajas, Oña, Saraguro (Azuay).

Desarrollo de Capacidades Analíticas INIAP-ESPE (CENCINAT); Inga. Karina Stael, Drs. Alexis Debut, Carlos Arroyo, Markus Gräfe).

Aislamiento, identificación y descripción de arcillas (< 2  $\mu\text{m}$ ) por DRX y FEG-SEM-EDS.

Mineralogía de Yachay (B. Palmer, Markus Gräfe).

DRX de polvos aleatorios de 4 muestras de 0-30 y 30-60 cm.







# Expresiones de Gratitud



- Esta investigación ha sido posible gracias a la buena voluntad y dedicación de las personas involucradas en el proyecto y al apoyo que recibimos de las estaciones experimentales EECA (Carlos Caicedo) y EESC (David Galarza):
  - Viáticos para viajar a la Estación Experimental Central de Amazonia (EECA),
  - Hospedaje en la EECA,
  - Suministro de Diesel y un camioneta para acceder los varios sitios de muestreo,
  - Suministro de reactivos para el análisis inicial
- Los autores agradecen al CENCINAT (ESPE, Sangolqui) por brindar acceso y soporte a la DRX y la FEG-SEM (Luis Cumbal, Carlos Arroyo).

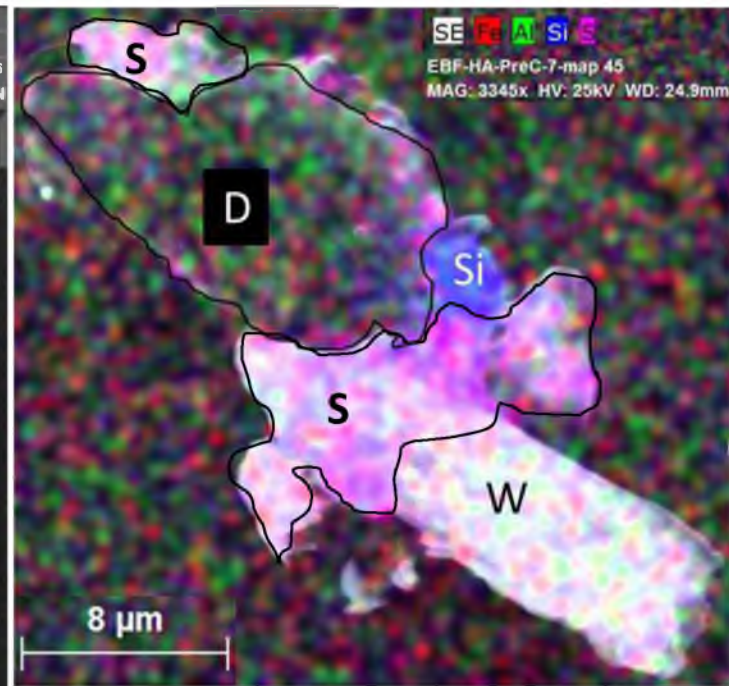
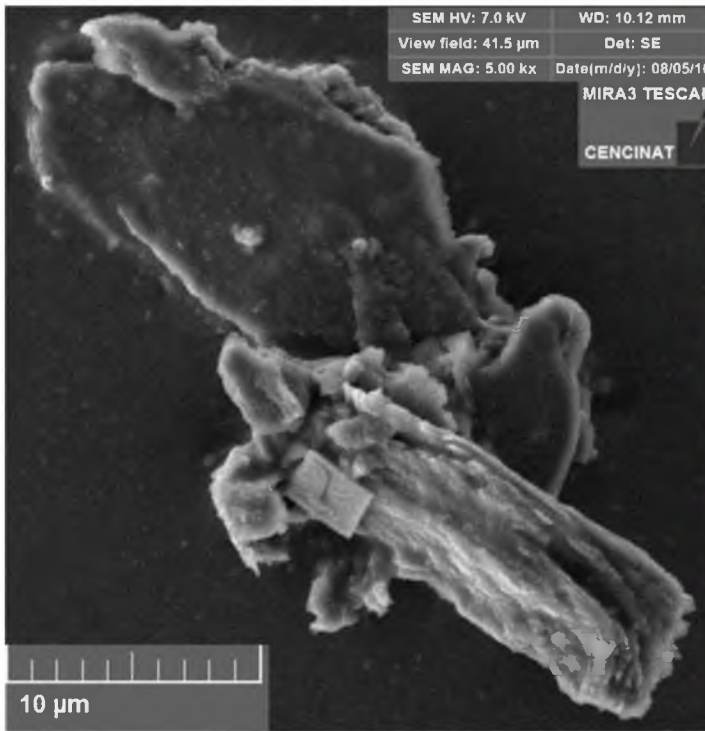


Izquierda a la derecha (Miembros del Equipo DMSA, EECA): Christian Apolo, Eduardo Sánchez, Alejandra Díaz, Patricia Jiménez



Thank you/ Gracias/ Danke/ Merci/ Спасибо/ Obrigado/ 谢谢





EBF-HA PreC7

Sample	Map		normalized mass %																			
			F	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Cs
Prec7	Mean	0.00	39.44	1.45	2.34	7.06	2.66	34.43	0.54	9.60	0.04	0.07	0.03	0.09	0.03	0.16	1.21	0.15	0.08	0.39	0.12	0.12
	±	0.00	11.96	1.21	1.36	2.34	1.12	2.31	0.15	13.85	0.05	0.11	0.03	0.08	0.04	0.13	0.72	0.18	0.16	0.64	0.14	0.23
	S.E.	0.00	3.99	0.40	0.45	0.78	0.37	0.77	0.05	4.62	0.02	0.04	0.01	0.03	0.01	0.04	0.24	0.06	0.05	0.21	0.05	0.08
D, n = 9	Mean	0.00	30.20	1.11	1.52	6.84	0.94	41.46	1.54	0.34	0.31	0.41	0.43	0.94	0.07	1.17	10.30	0.57	0.12	0.87	0.75	0.09
	±	0.00	8.73	1.59	2.13	2.46	1.59	7.40	0.63	0.38	0.33	0.38	0.44	0.61	0.12	1.29	4.67	0.73	0.33	1.10	0.97	0.17
	S.E.	0.00	2.91	0.53	0.71	0.82	0.53	2.47	0.21	0.13	0.11	0.13	0.15	0.20	0.04	0.43	1.56	0.24	0.11	0.37	0.32	0.06
Si, n = 3	Mean	0.00	27.07	1.09	2.05	35.19	4.61	24.67	0.65	0.10	0.13	0.07	0.06	0.77	0.00	0.33	2.10	0.59	0.20	0.09	0.23	0.00
	±	0.00	6.96	1.01	0.29	11.61	0.88	3.91	0.04	0.04	0.15	0.05	0.06	0.29	0.00	0.16	1.38	0.71	0.28	0.12	0.22	0.00
	S.E.	0.00	4.02	0.58	0.17	6.71	0.51	2.26	0.02	0.02	0.09	0.03	0.03	0.17	0.00	0.09	0.80	0.41	0.16	0.07	0.13	0.00
W, n = 15	Mean	0.00	38.54	2.90	4.48	10.38	5.36	31.52	0.74	0.48	0.07	0.10	0.23	0.53	0.16	0.41	2.96	0.27	0.20	0.24	0.23	0.19
	±	0.00	5.49	1.33	1.81	2.13	1.81	4.69	0.26	0.77	0.09	0.15	0.29	0.46	0.21	0.30	1.33	0.38	0.50	0.34	0.30	0.52
	S.E.	0.00	1.83	0.44	0.60	0.71	0.60	1.56	0.09	0.26	0.03	0.05	0.10	0.15	0.07	0.10	0.44	0.13	0.17	0.11	0.10	0.17





Caracterización mineralógica de suelos de la Amazonía ecuatoriana: Implicaciones a la agricultura y biodiversidad

Técnicas para disminuir la disponibilidad de Cd en suelos de cacaoteras (UTE-ESPE- INIAP; Dr. Manuel Carillo, Alexis Debut, Markus Gräfe)

Desarrollo de Capacidades Analíticas INIAP-ESPE (CENCINAT); Karina Stael, Alexis Debut, Carlos Arroyo, Markus Gräfe)

Terminar la interpretación y publicar los datos en una revista de la ciencia de suelo con alto impacto (ej., Geoderma)

Machala, Península Sta. Elena, Esmeraldas, Quevedo, (+ de Amazonia y Sto. Domingo).

Aislamiento, identificación y descripción de arcillas (< 2  $\mu\text{m}$ ) por DRX y FEG-SEM-EDS.

Cuantificación las fases mineralógicas en patrones de DRX

