
Anexo B - 1

Análisis de difracción de rayos X (DRX)

Bogotá D.C. Febrero 5 de 2014

Geólogo
Andrés Felipe Gallego Rios
Consortio Llanos Orientales
Geoand22@hotmail.com
Bogotá, D.C. – Colombia

REF: Resultados Análisis de Difracción de rayos X –Consortio Llanos Orientales

Estimado Geólogo Andrés:

Gracias por usar los servicios analíticos de GMAS. Agradecemos su confianza así como sus sugerencias para la mejora de la calidad y eficiencia de nuestro servicio.

A continuación encuentra el reporte final de los resultados de difracción de rayos X, análisis llevados a cabo en 19 muestras, por favor no dude en contactarnos si tiene alguna pregunta.

Cordialmente,



CLEMENCIA GOMEZ
Geóloga PhD
GMAS SAS
Teléfono (+571) 2357568 Ext. 114

GMAS S.A.S. LABORATORIO DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA.
Departamento de Difracción de Rayos X

Informe: **GMR-0524**

Fecha de Entrega: Febrero 05 de 2014

TABLA DE CONTENIDO

1. INSTRUMENTACIÓN Y PARÁMETROS.....	2
2. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN	2
3. PROCEDIMIENTO DE CUANTIFICACIÓN.....	2
4. RESULTADOS CUANTITATIVOS.....	4
5. DIFRACTOGRAMAS.....	6
6. BIBLIOGRAFÍA.....	25

1. INSTRUMENTACIÓN Y PARÁMETROS

Difractómetro Bruker D8 Advance -Serie I

Detector VANTEC-1 PSD

Tubo de rayos-X Co 1.9Kw (K alpha $\lambda = 1.799$)

Filtro de Hierro

35KV 30mA

Muestras en polvo: 2θ : $5^\circ - 70^\circ$; Muestras orientadas: $3.4^\circ - 35^\circ$

Tamaño del paso: 0.016

Velocidad de barrido: 0.4 segundos por paso

2. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN

Para preparar la muestra en polvo, 5g de muestra fueron pulverizados hasta alcanzar tamaños menores a $44\mu\text{m}$ (Sieve # 325); posteriormente el polvo fue comprimido con una espátula sobre un portamuestras de aluminio y difractado (Zhang et al. 2003).

Para el análisis de minerales de arcilla, se hizo una suspensión de 3g de la muestra en polvo en 50ml de agua destilada, se agitó y se dejó reposar por 50 minutos. Con una pipeta se tomaron los primeros centímetros de la suspensión, se depositaron sobre un portamuestras de vidrio y se dejaron secar a temperatura ambiente. Con este tratamiento los minerales arcillosos se orientan preferencialmente sobre sus planos basales y se orientan. Esta preparación se difractó para obtener el patrón "Secado al aire" o "Air Dried".

La misma preparación fue solvatada con etilenglicol en un desecador por 5 horas después de hacer vacío –remoción del aire y reemplazamiento por vapores de etilenglicol-. Cuando pasaron 5 horas la muestra solvatada se difractó, obteniéndose el patrón "Glicolado" o "Ethylene Glycol".

Finalmente la misma preparación fue puesta en una mufla y calentada durante 4 horas. Después de esto se difractó, obteniendo el espectro "calcinado" o "Heated 550°C ". (Thorez, 1976).

3. PROCEDIMIENTO DE CUANTIFICACIÓN

El método RIR para análisis cuantitativo también es conocido como flujo de matriz, debido a que la absorción de la matriz afecta la siguiente ecuación para análisis cuantitativo. En su forma más general la ecuación que define el método RIR es:

$$RIR_{i,s} = \left(\frac{X_s}{X_i} \right) \left(\frac{I_{(hkl)i}}{I_{(hkl)'s}} \right) \left(\frac{I_{(hkl)'s}^{rel}}{I_{(hkl)i}^{rel}} \right)$$

Donde X corresponde a la fracción en peso, I a la intensidad, Irel a la intensidad relativa y los subíndices i y s indican respectivamente la fase y la fase estándar o de calibración.

Cuando la fase estándar es corindón y la proporción es determinada de acuerdo con la convención de la línea más intensa del corindón I(113) y de la línea más intensa de la fase estudiada i, I(hkl) en una mezcla 50:50 por peso, Los valores RIR son conocidos como I/I_{cor} o RIR_{cor}. En términos de RIR_{cor} la concentración de cualquier fase i en una muestra mezclada con una cantidad conocida de corindón está dada por:

$$X_i = \left(\frac{X_{cor}}{RIR_{cor}} \right) \left(\frac{I_{(hkl)i}}{I_{(113)cor}} \right)$$

Chung (1974) reconoció que si todas las fases en una mezcla son conocidas y sus RIR son conocidos también, entonces la suma de todas las fracciones, de todas las fases debe ser igual a 1. Esto permite el establecimiento de un sistema de n ecuaciones para resolver las n fracciones de pesos sin la necesidad de la adición de una muestra *spike* a la muestra analizada, usando la siguiente ecuación:

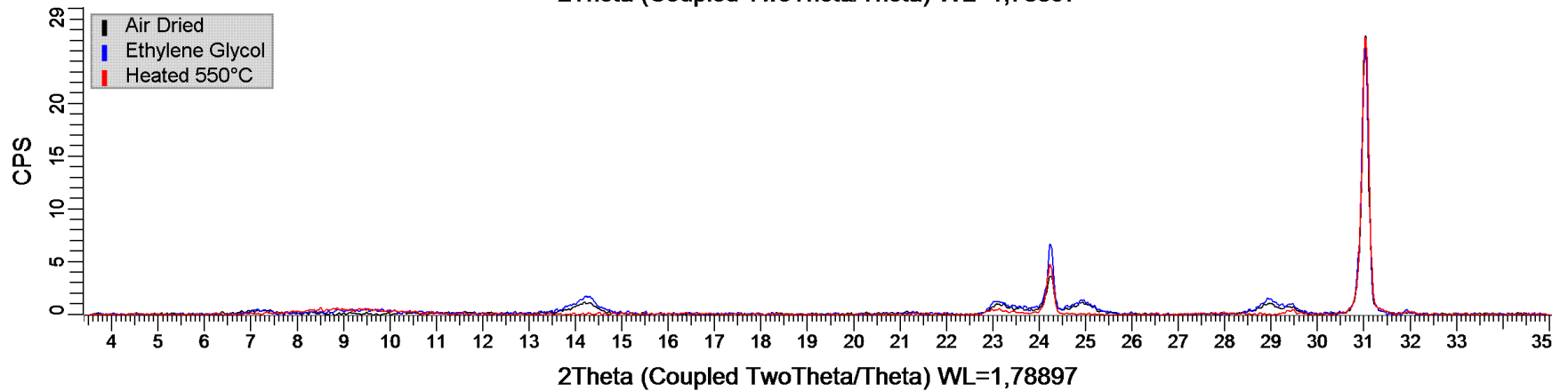
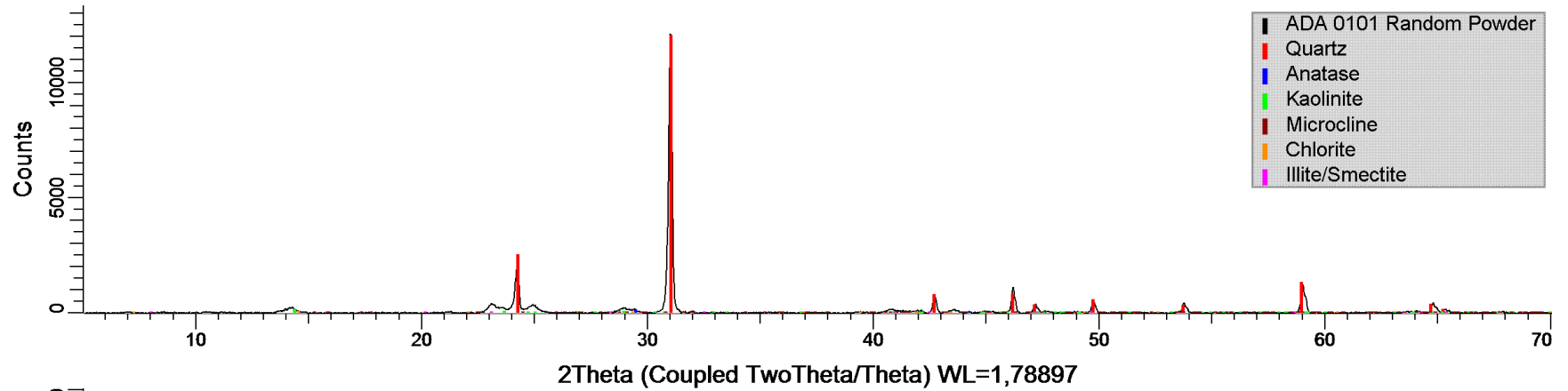
$$X_{\alpha} = \frac{I_{(hkl)\alpha}}{RIR_{\alpha} I_{(hkl)\alpha}^{rel}} \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^{\#phases} (I_{(hkl)'j} / RIR_j I_{(hkl)'j}^{rel})} \right]$$

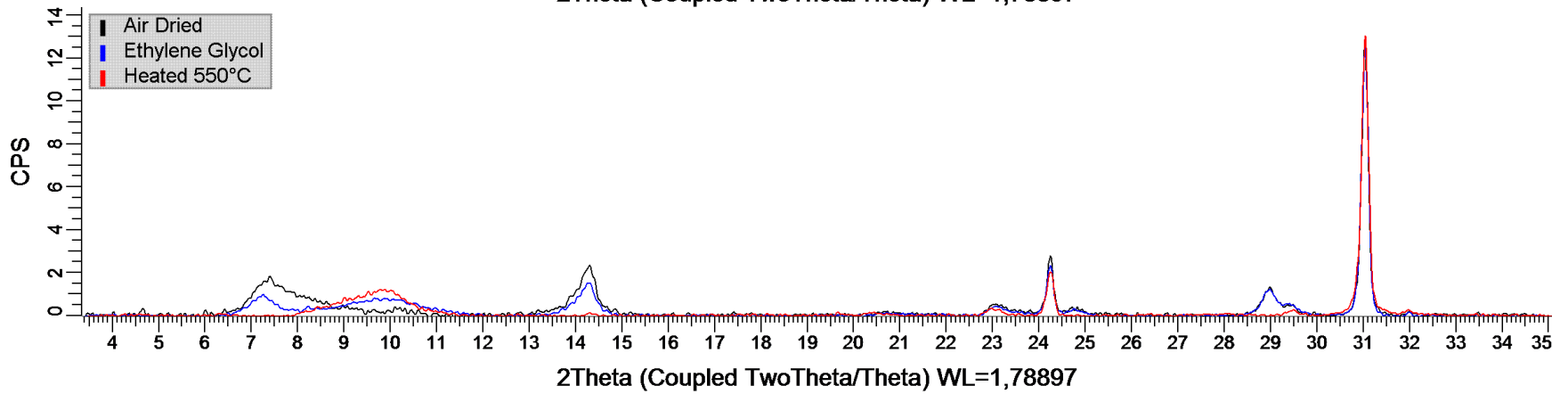
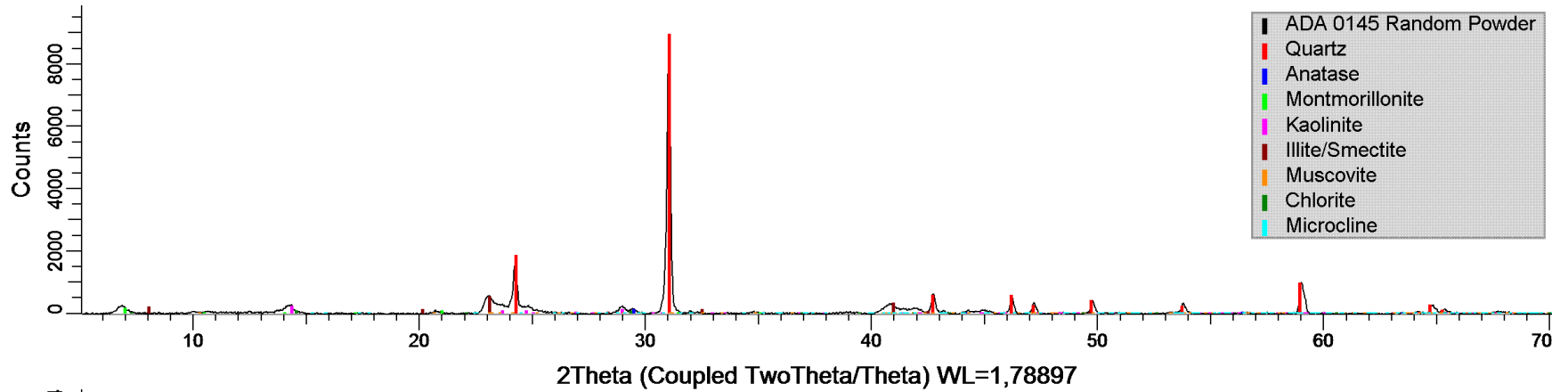
4. RESULTADOS CUANTITATIVOS

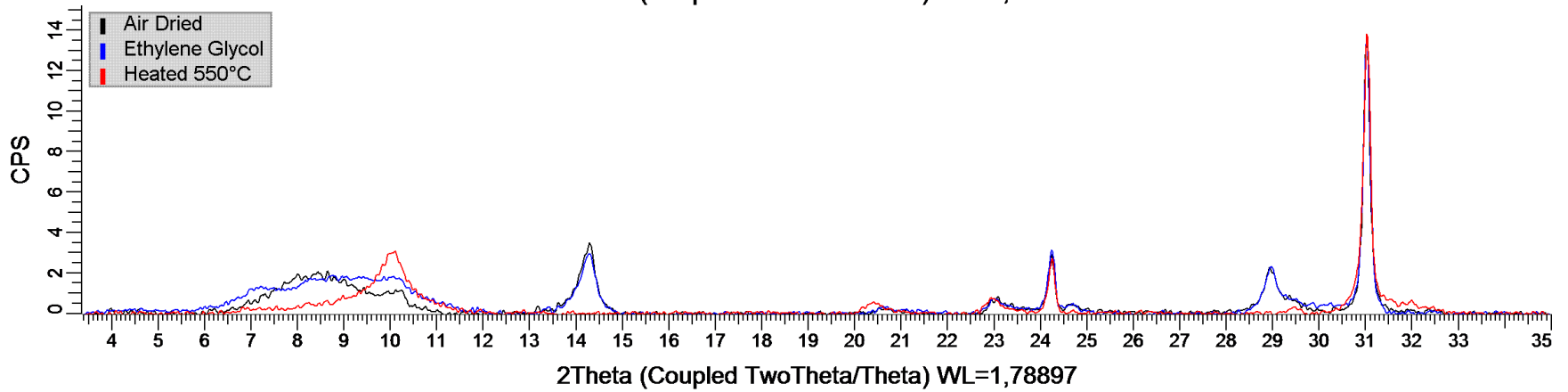
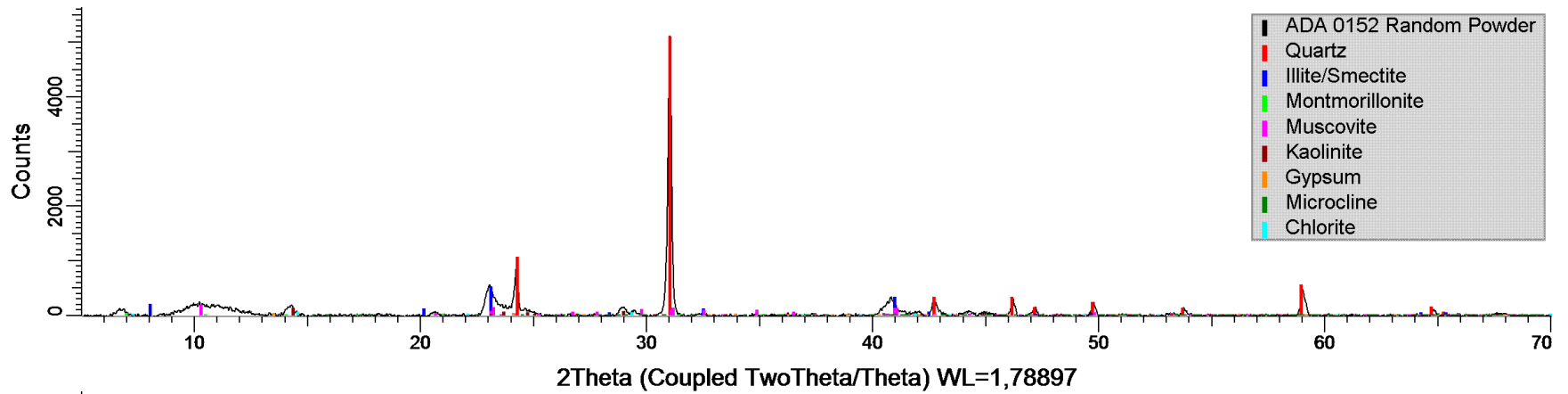
CONSORCIO LLANOS ORIENTALES	Procedimientos llevados a cabo			
	Muestra	Polvo	Orientado	Glicolado
ADA0101	Si	Si	Si	Si
ADA0145	Si	Si	Si	Si
ADA0152	Si	Si	Si	Si
ADA179C	Si	Si	Si	Si
ADA0196	Si	Si	Si	Si
ADA0214	Si	Si	Si	Si
ARF0043C	Si	Si	Si	Si
ARF0066C	Si	Si	Si	Si
ARF0135	Si	Si	Si	Si
ARF0157	Si	Si	Si	Si
CAM0024A	Si	Si	Si	Si
CAM0352	Si	Si	Si	Si
CAM0376	Si	Si	Si	Si
CAM0433	Si	Si	Si	Si
LES0054	Si	Si	Si	Si
LES0056	Si	Si	Si	Si
LES0152A	Si	Si	Si	Si
PDH0355A	Si	Si	Si	Si
PDH0355G	Si	Si	Si	Si

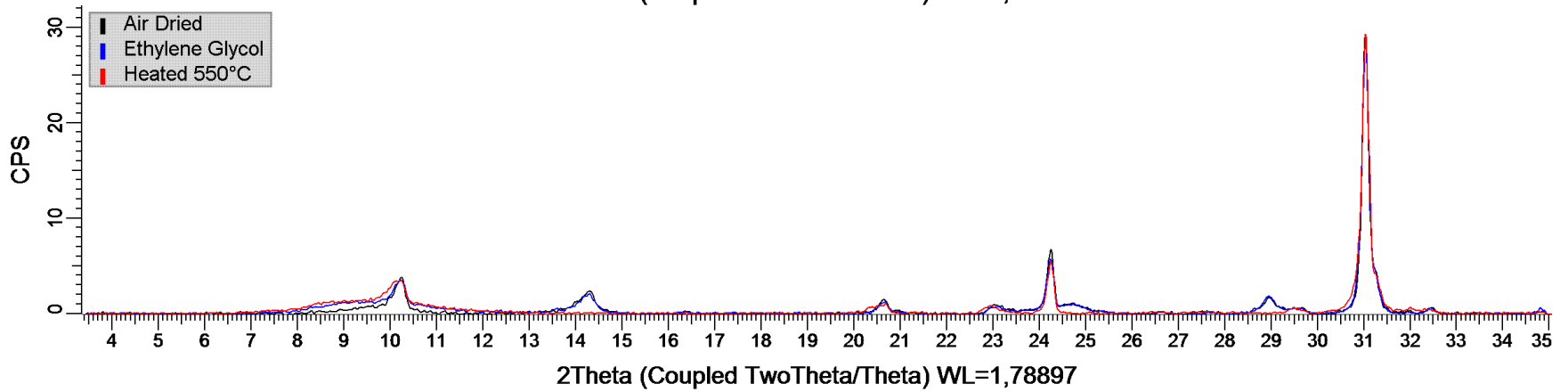
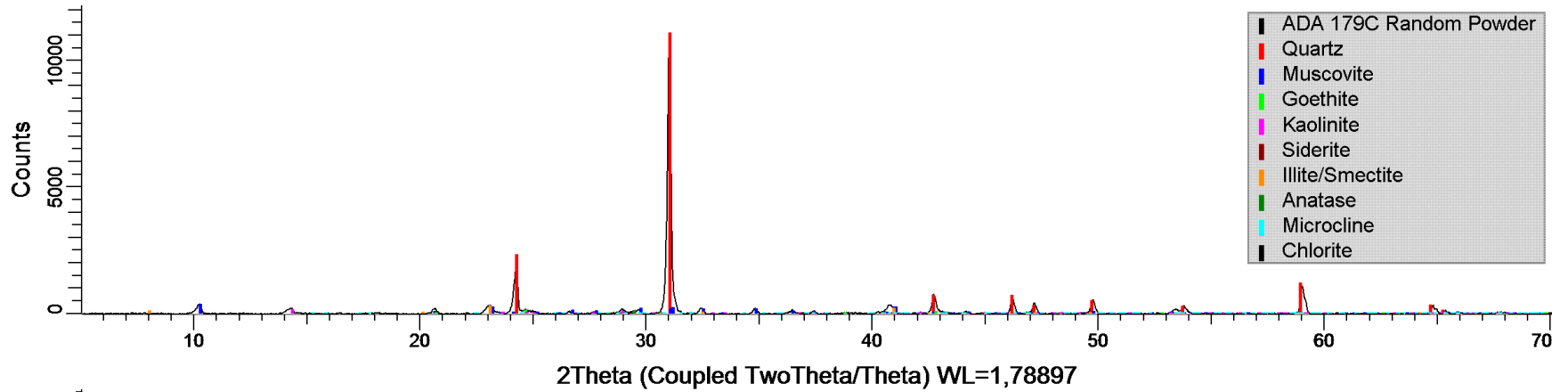
ONSORCIO LLANOS ORIENTALES	CUANTIFICACION															
	CARBONATES		OTHERS							CLAY MINERALS					Total (%)	
Sample	Calcite	Siderite	Quartz	Pyrite	Anatase	Gypsum	Goethite	Gibbsite	K-Feldspar	Plagioclase	Illita Mica	I / Sm	Montmorillonite	Chlorita		Kaolinite
ADA0101			88,1		1,3				0,5			1,4		0,6	8,1	100
ADA0145			58,4		1,2				0,4		1,9	19,0	7,1	0,7	11,2	100
ADA0152			48,0			0,9			0,4		11,8	26,0	2,8	0,7	9,5	100
ADA179C		0,8	64,0		0,9		1,8		0,5		13,9	10,4		0,3	7,5	100
ADA0196			50,8		0,8				0,3		11,4	25,2		0,3	11,2	100
ADA0214		1,0	66,8		1,0				1,0		10,3		6,6	0,5	12,8	100
ARF0043C			18,0		2,0				0,2		3,8	22,3			53,7	100
ARF0066C			62,2		2,0	0,4		8,3	0,7		13,0			1,0	12,4	100
ARF0135			46,5	1,6	4,5				1,2		3,3			2,6	40,5	100
ARF0157			61,7		2,9			1,3	0,8		4,0			1,6	27,6	100
CAM0024A			39,3		1,7			9,2	0,5		3,9	18,2		0,9	26,4	100
CAM0352			45,5		1,8			20,4	0,5		5,9	9,8	3,2	0,6	12,3	100
CAM0376			48,5		2,3			4,5	1,0		6,3	10,4	3,1	1,1	22,8	100
CAM0433			51,4		1,9			20,9	0,8		6,7			1,1	17,2	100
LES0054			38,3		4,2			19,1			5,0		7,4	1,0	25,0	100
LES0056		0,1	83,3						0,8	0,2	8,2	6,2	0,5	0,2	0,6	100
LES0152A		0,8	62,0		1,0				0,7	4,4	15,2			1,8	14,1	100
PDH0355A			78,6				4,2				7,7			0,6	8,8	100
PDH0355G		3,9	66,8		1,0		1,5				8,7	8,0		0,7	9,5	100

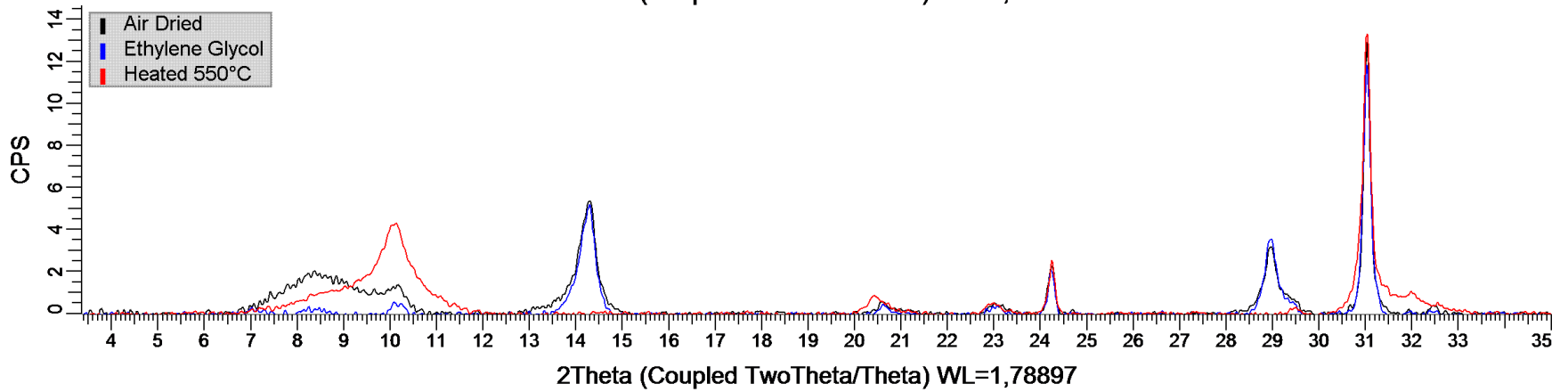
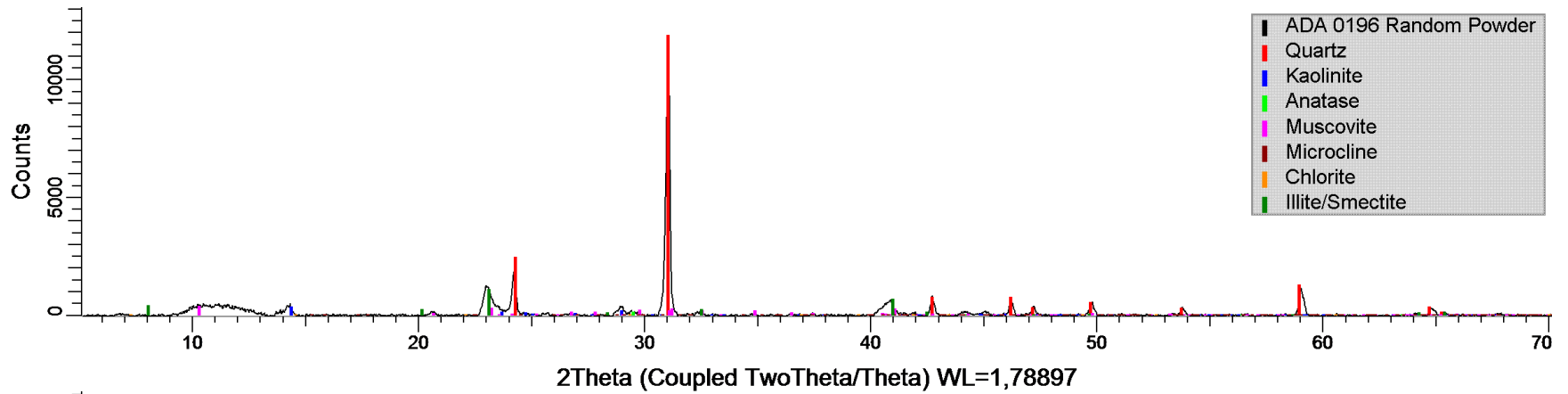
5. DIFRACTOGRAMAS

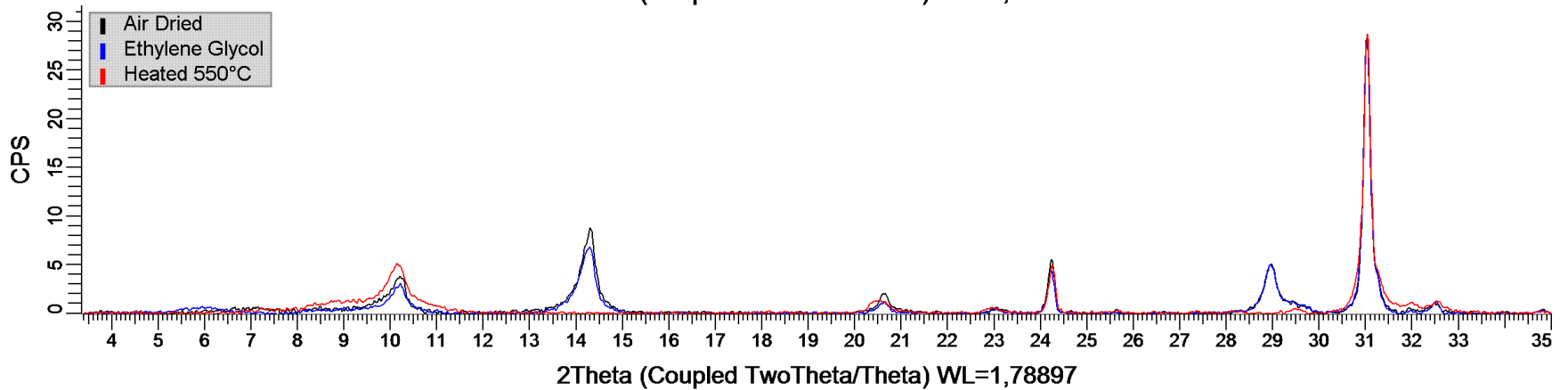
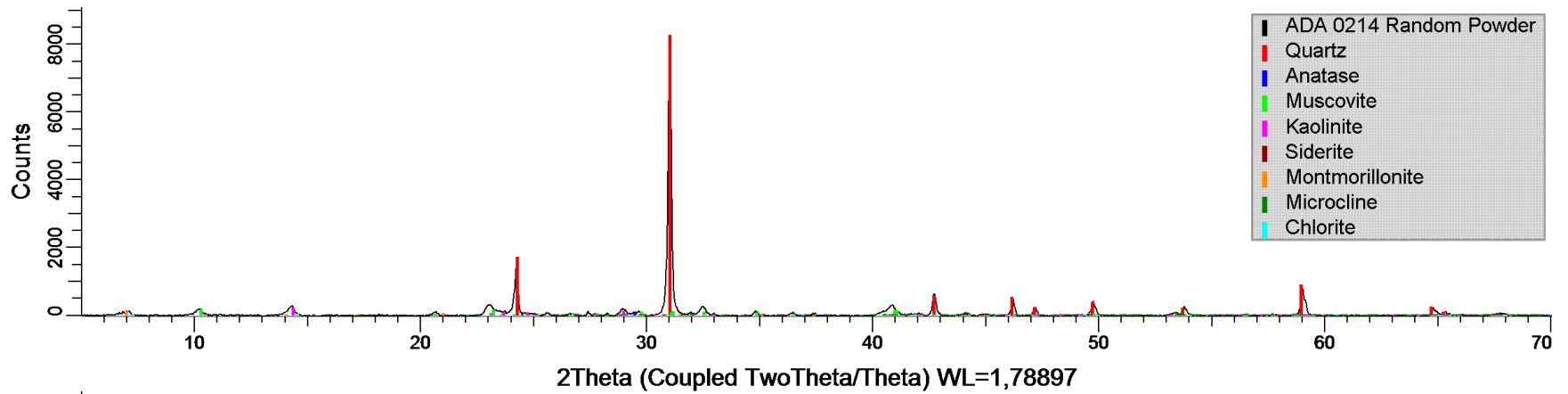


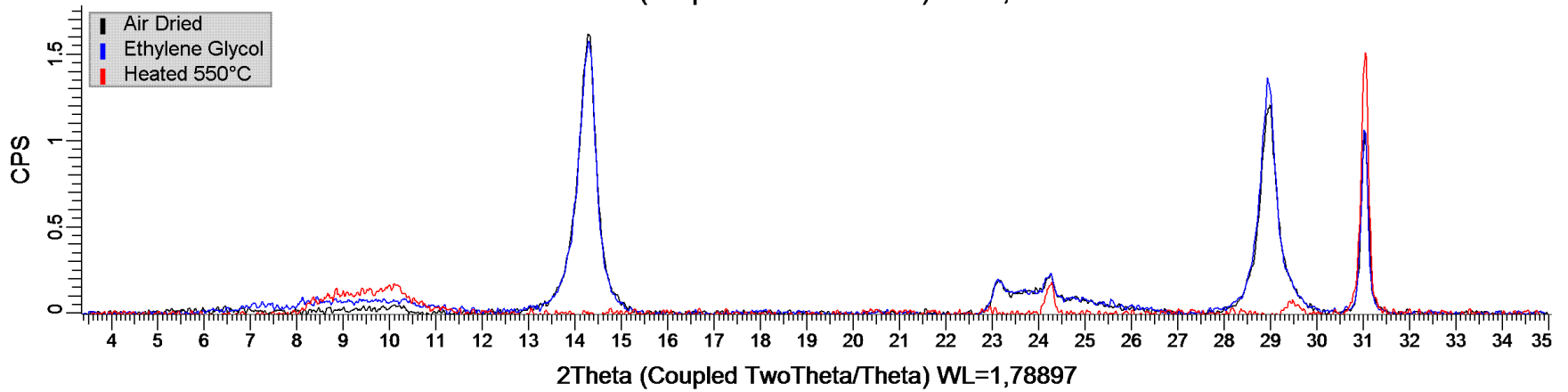
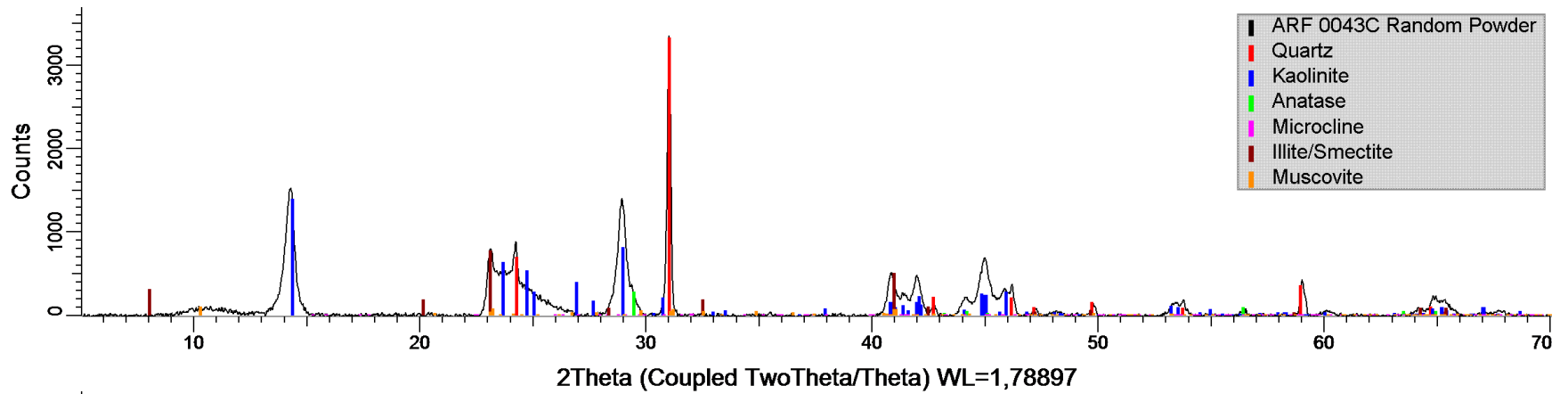


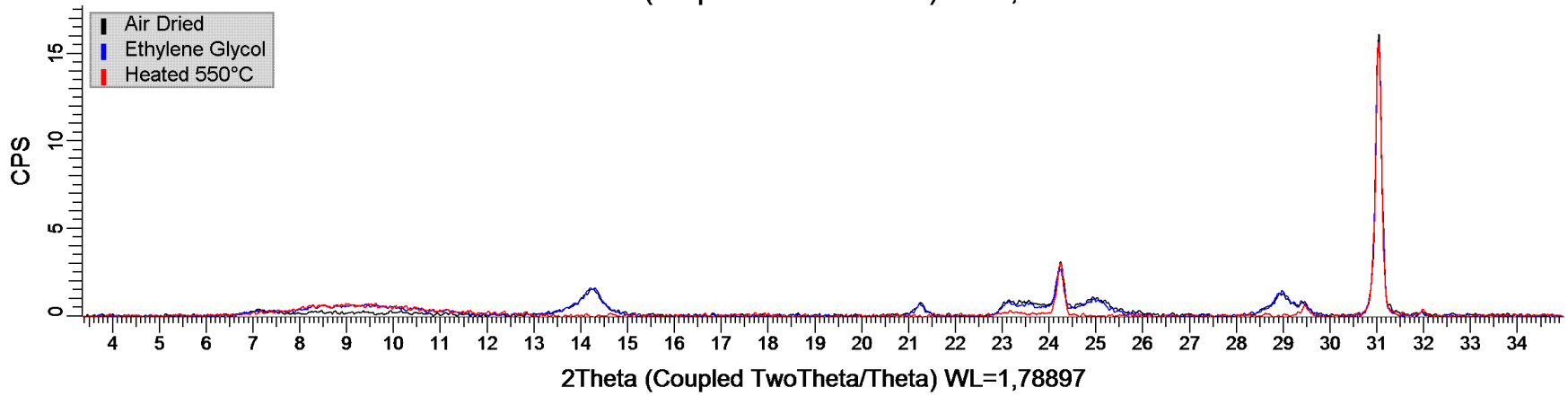
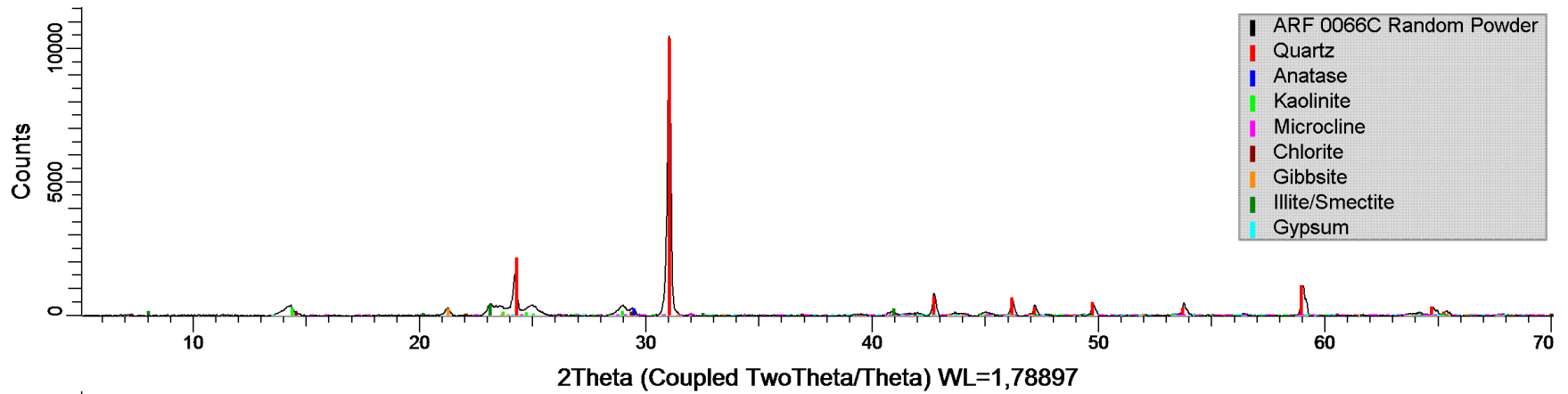


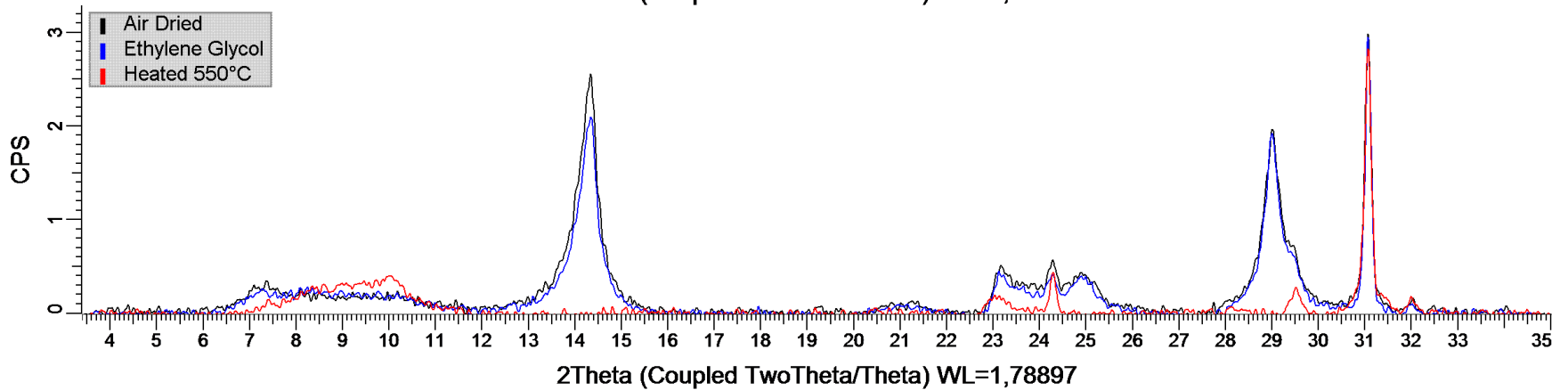
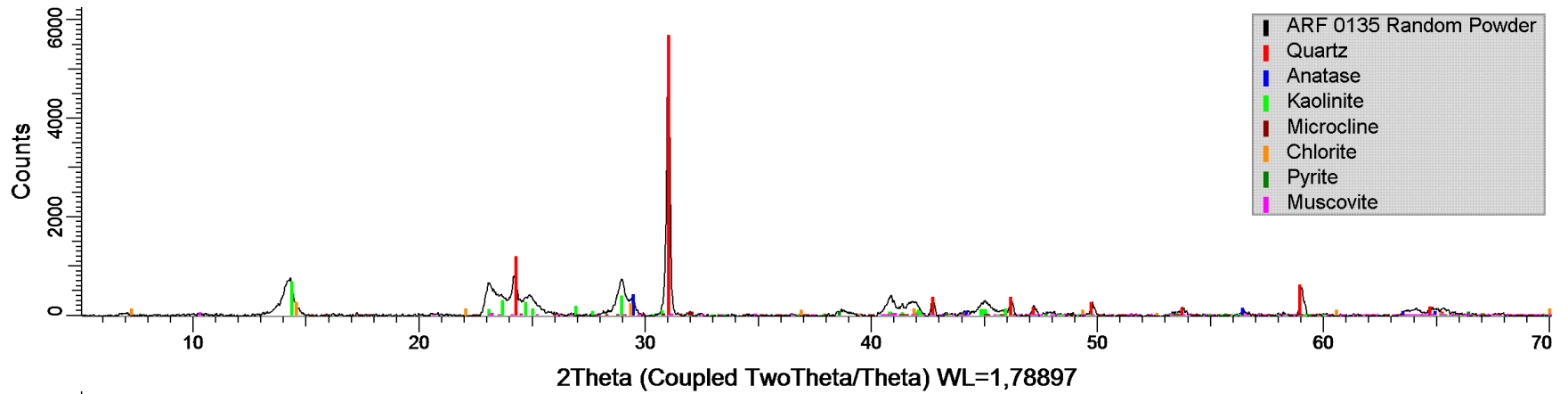


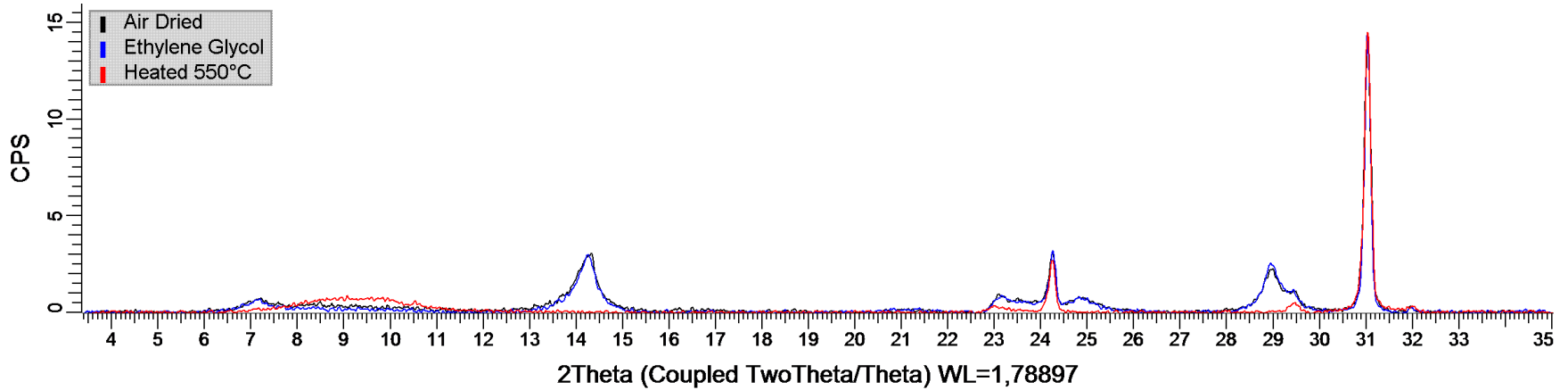
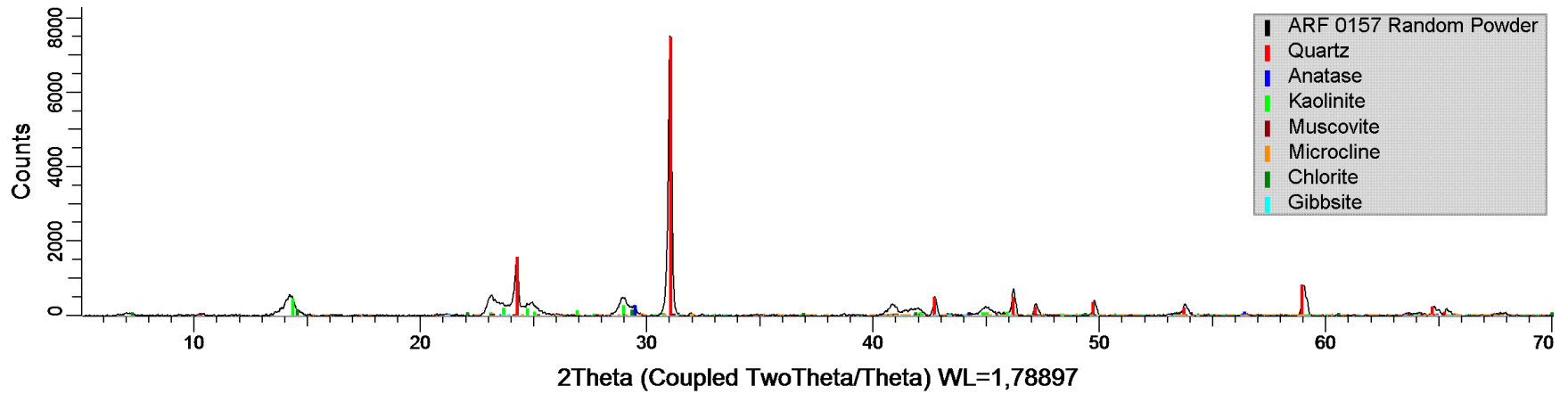


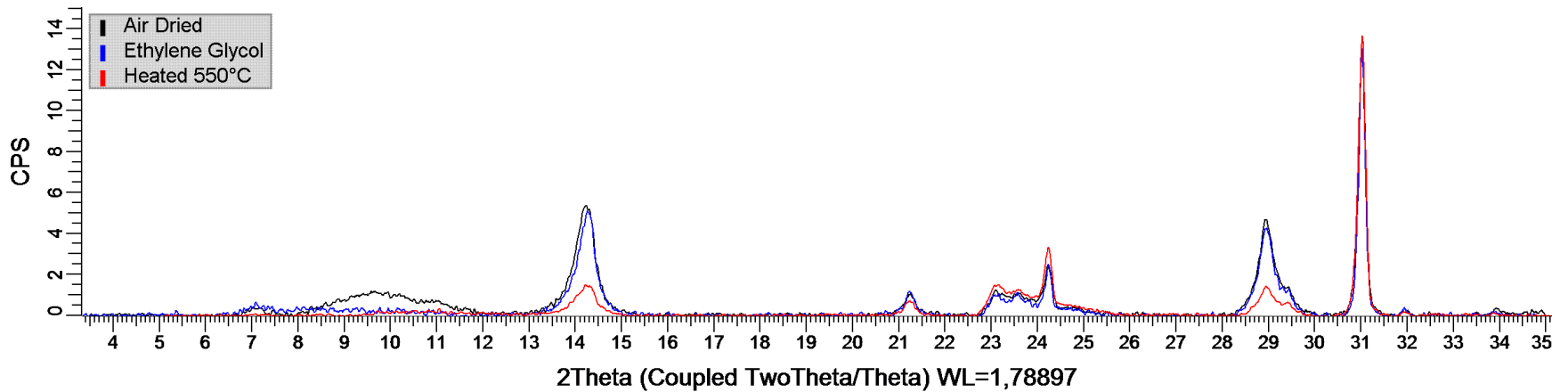
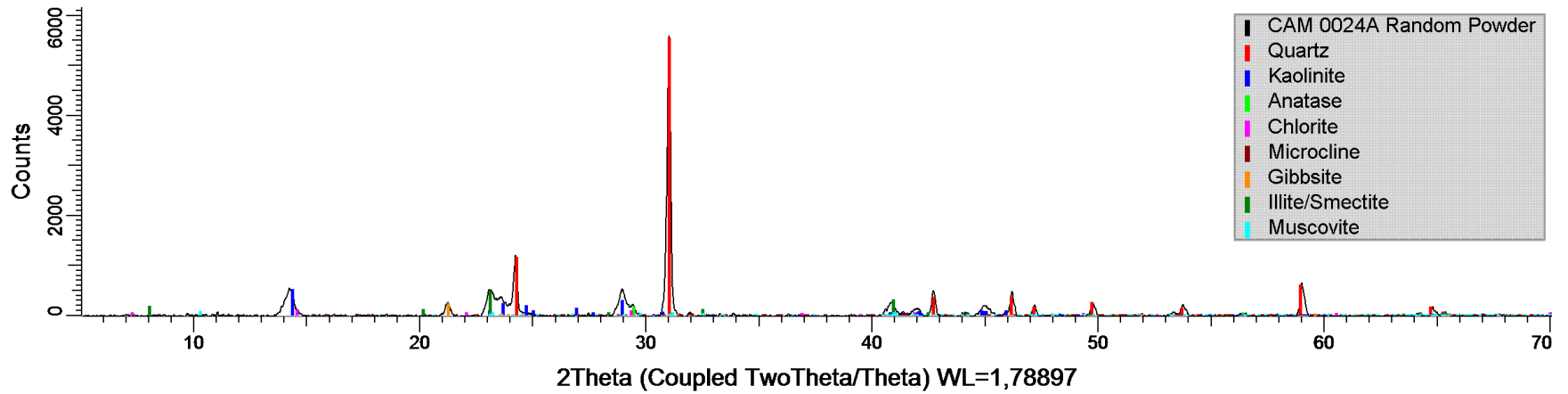


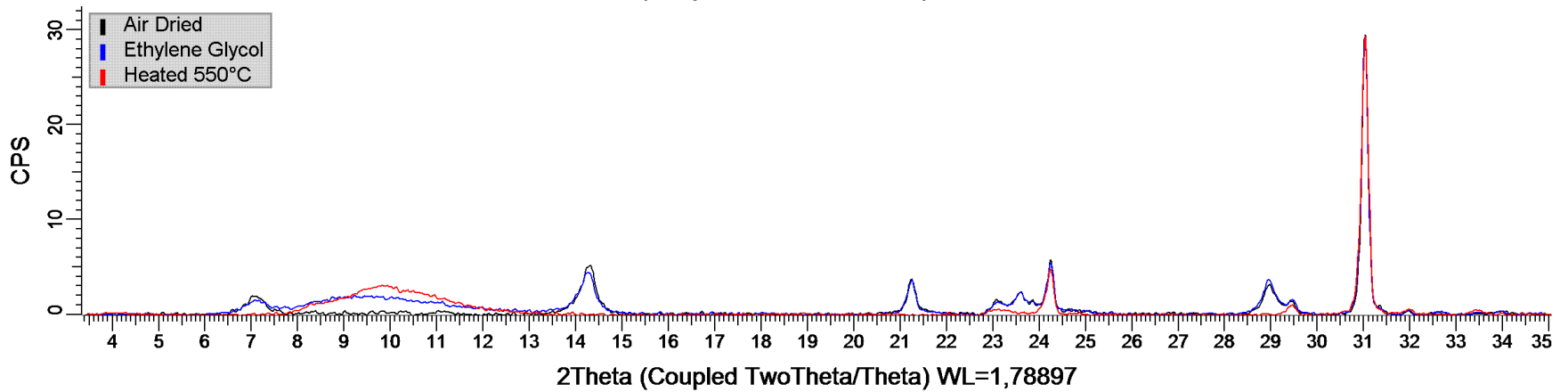
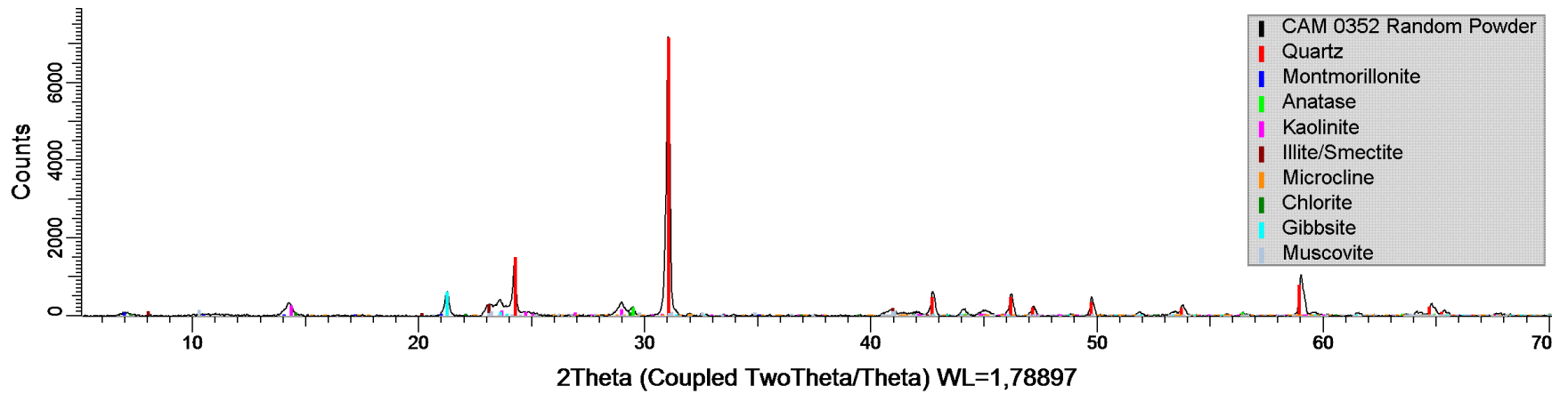


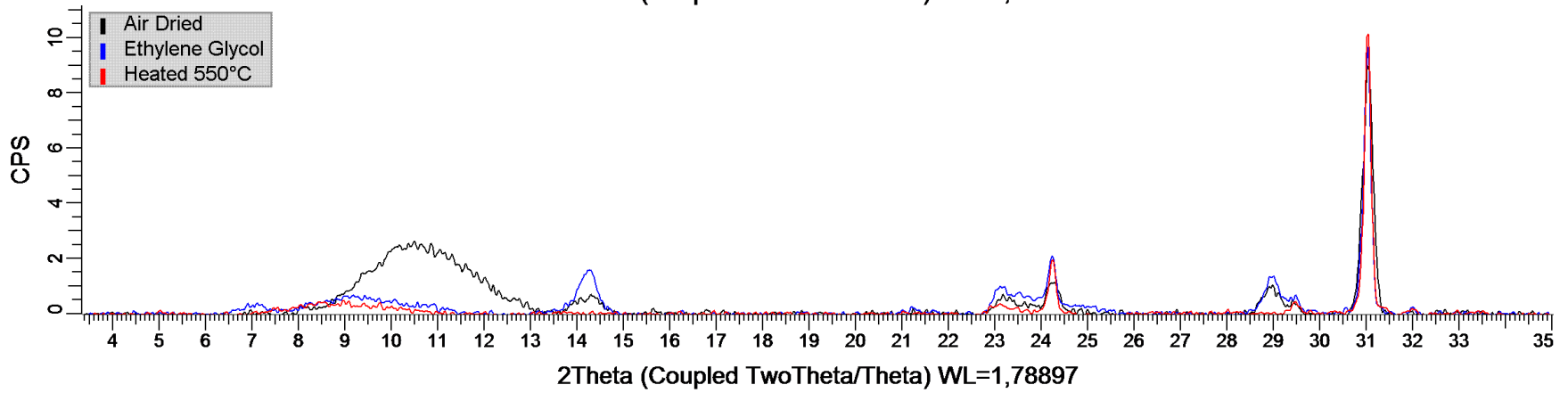
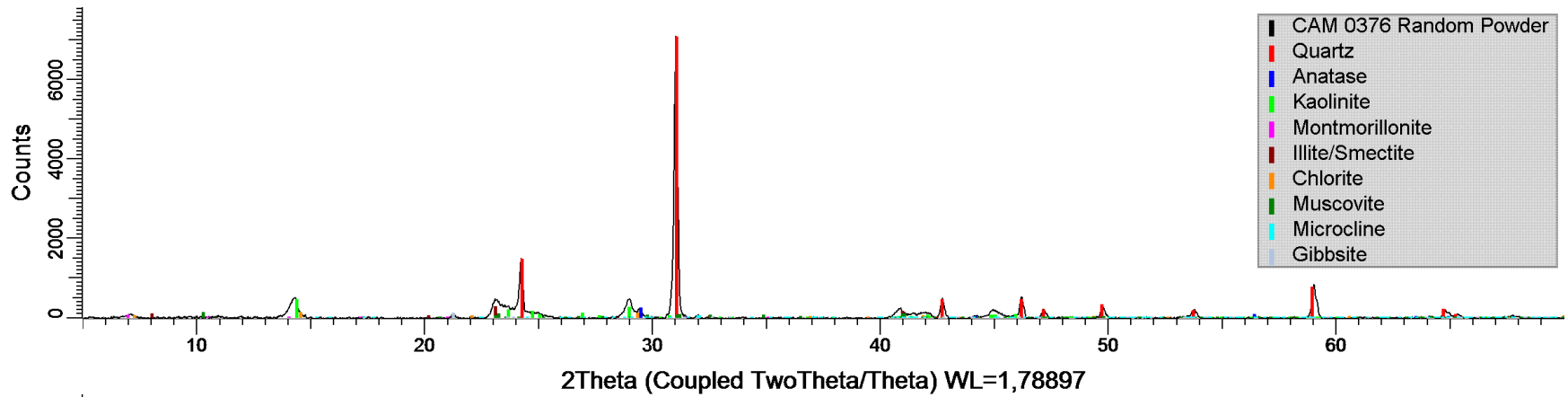


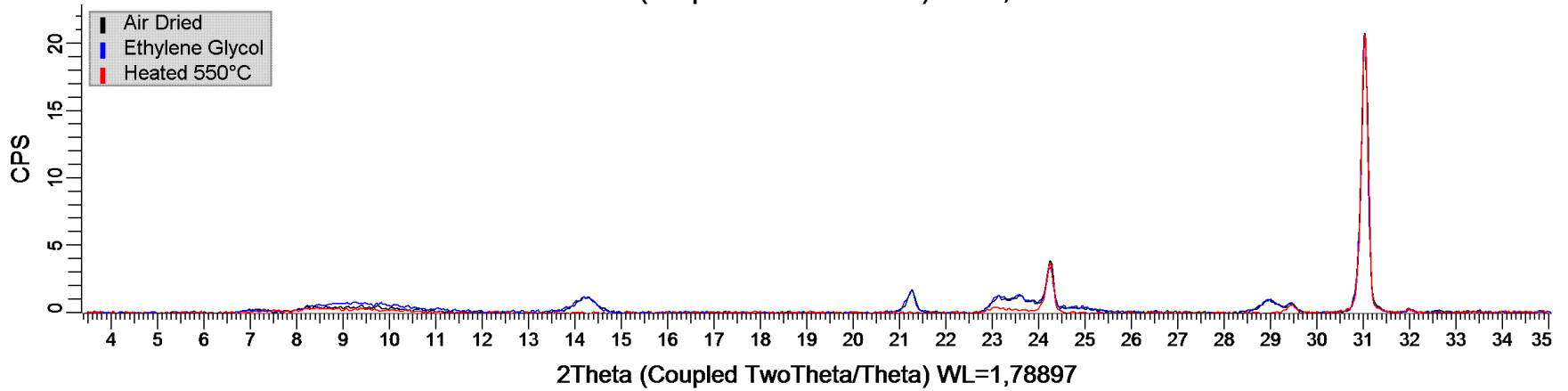
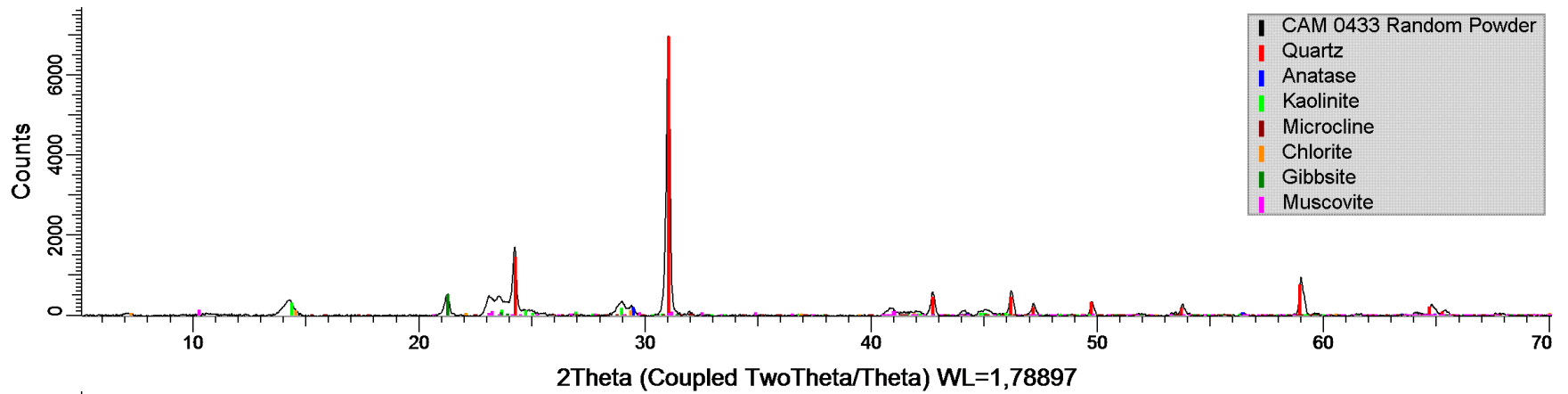


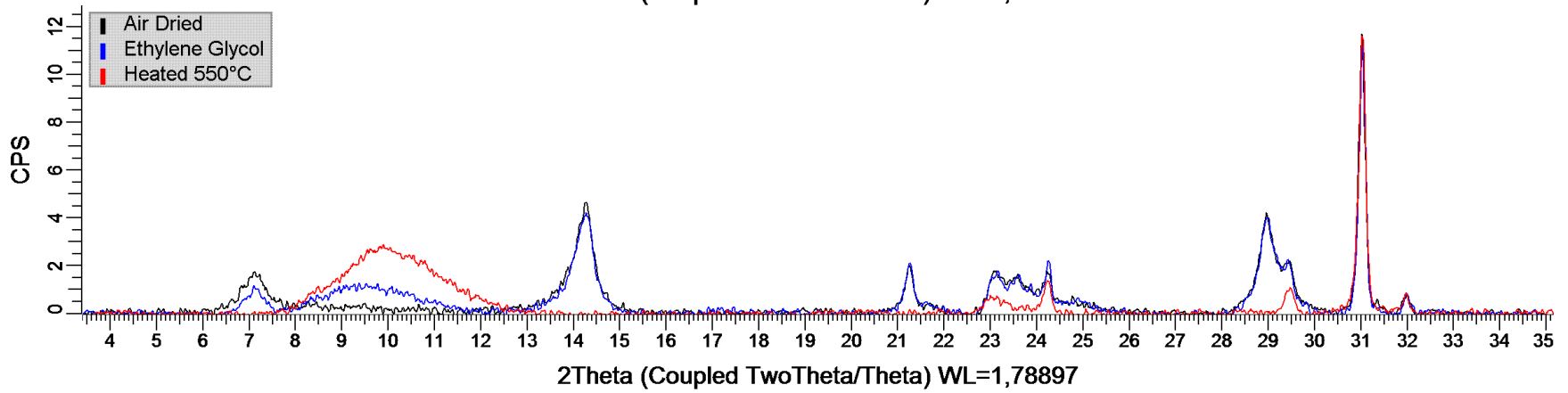
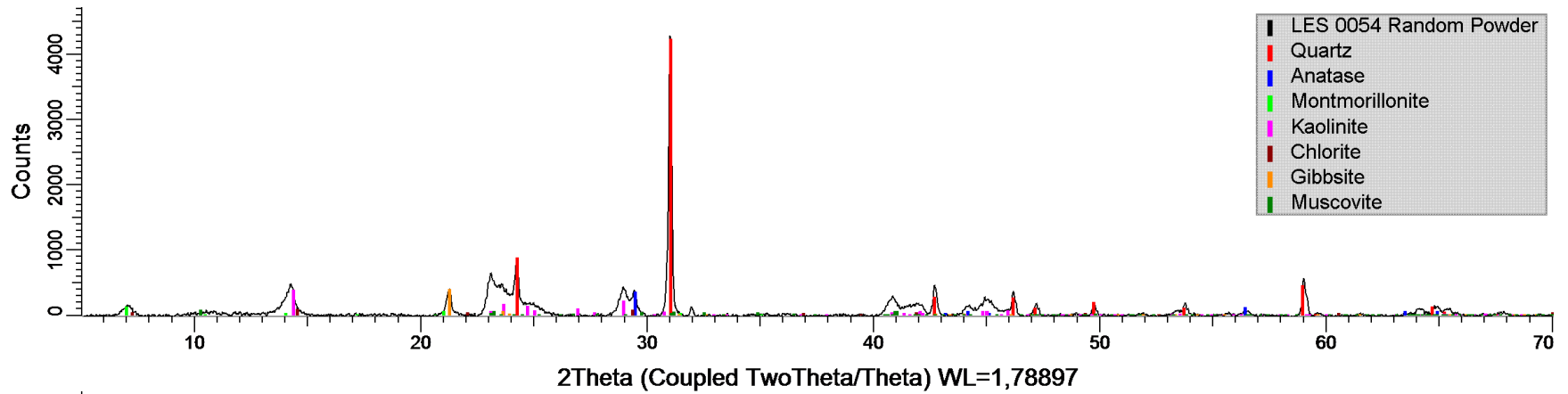


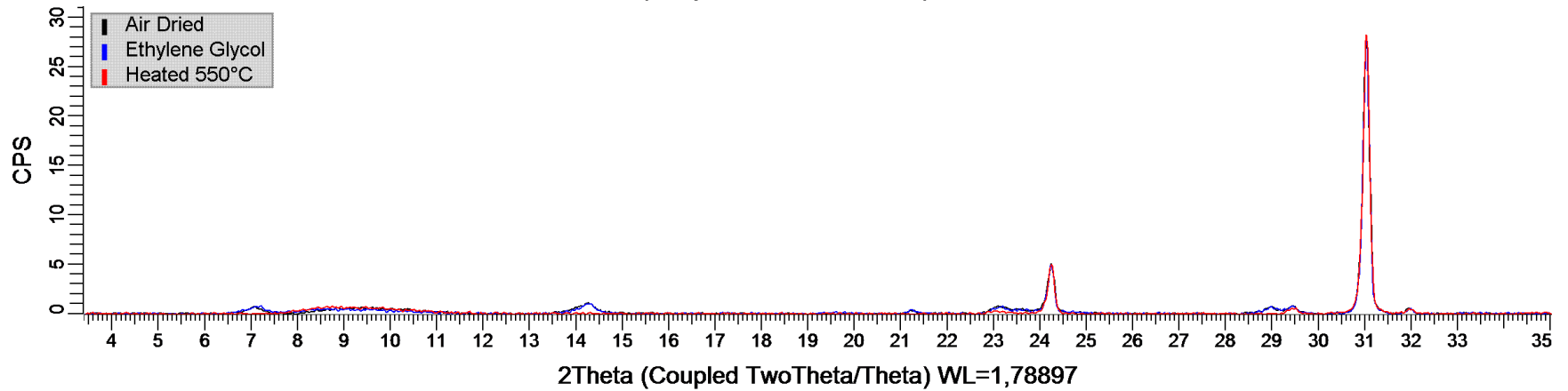
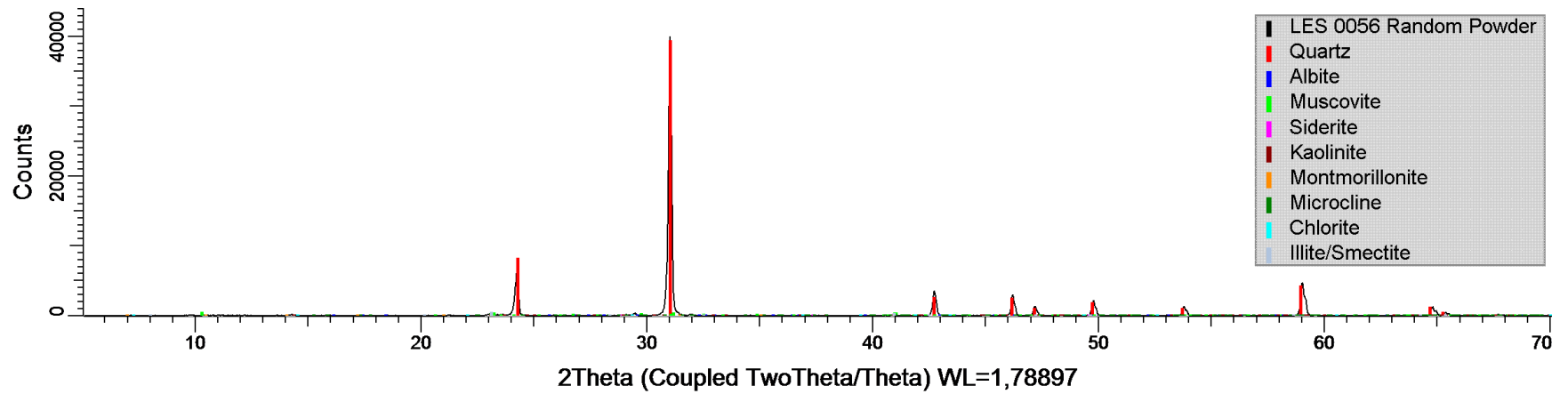


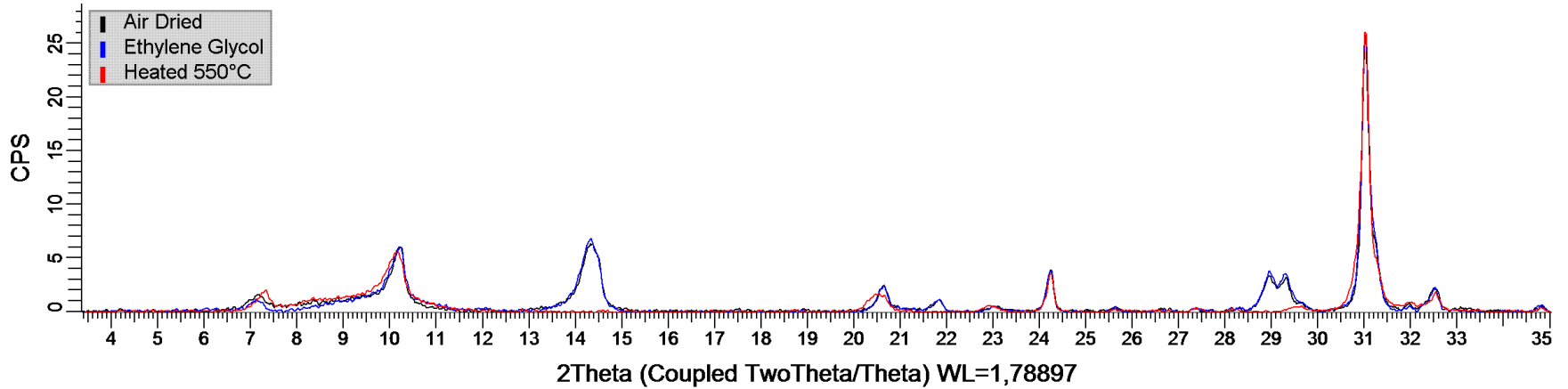
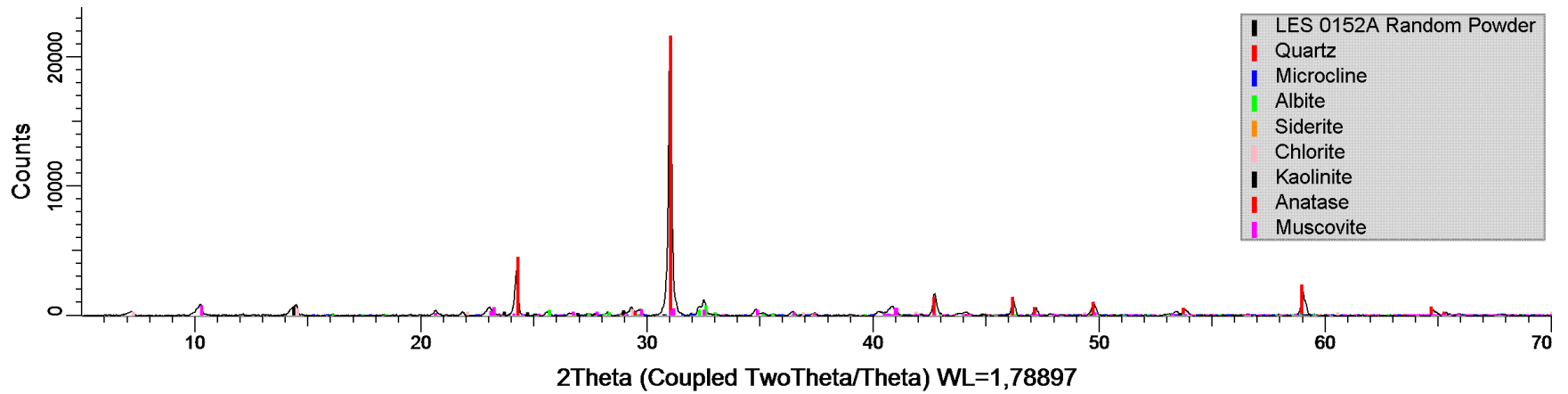


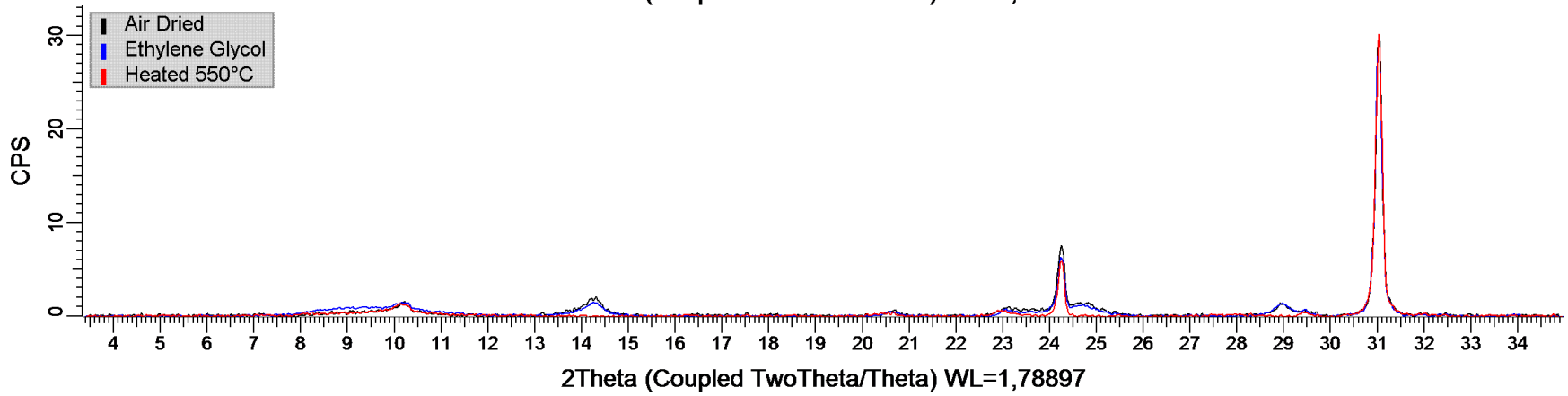
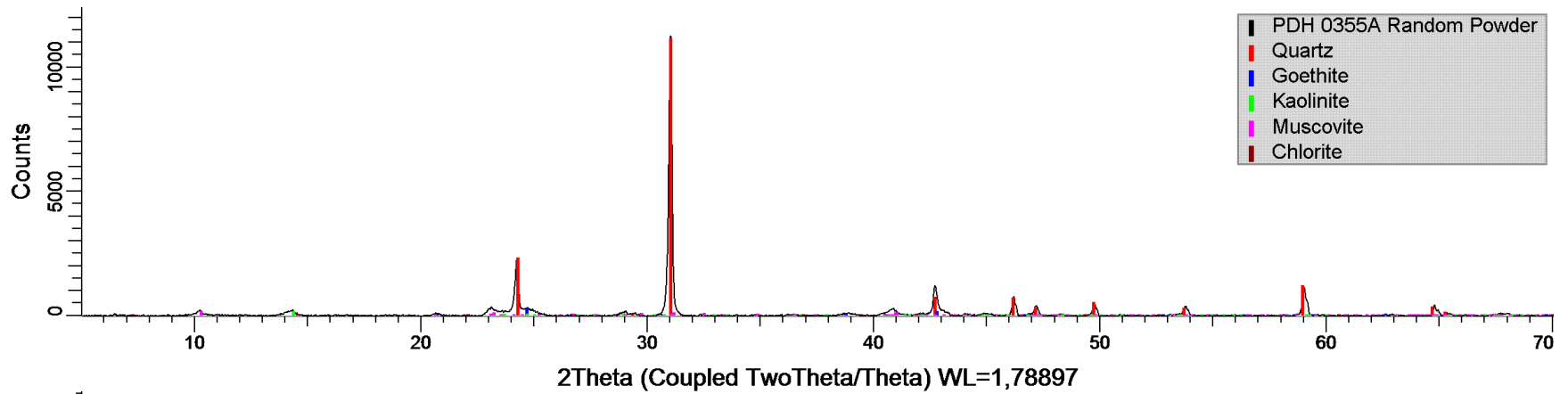


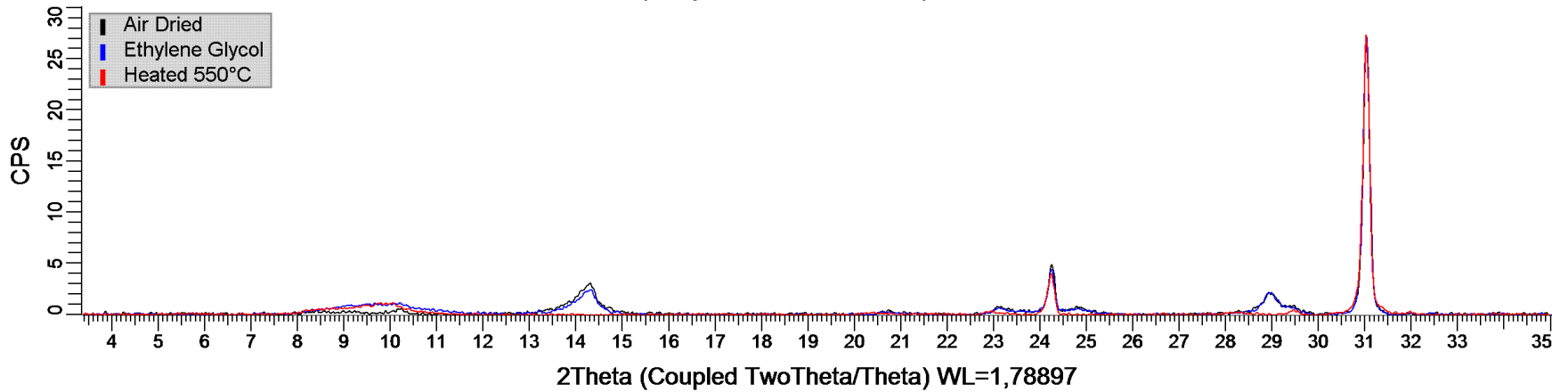
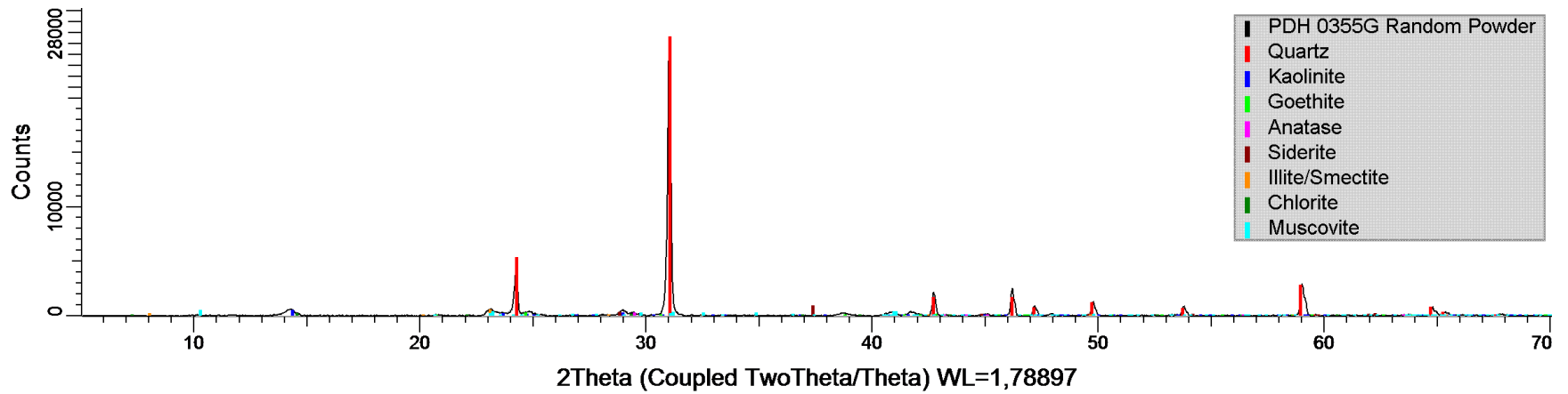












6. BIBLIOGRAFÍA

- Chipera S. & Bish D. *Baseline studies of The Clay Minerals Society source clays: Powder x-ray diffraction analysis*. Clays and clay minerals, Vol. 49, No. 5, 398-409, 2001.
- Moore D. & Reynolds R. *X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press -Second Edition-, New York, 1997.
- Thorez J. *Practical identification of clay minerals*. Editions G. Lelotte, Belgium, 1976.
- www.webmineral.com
- Zhang G. et al. *A simple sample-mounting method for random powder x-ray diffraction*. Clays and Clay Minerals, Vol. 51, No. 2, 218–225, 2003.

Bogotá D.C. Marzo 12 de 2014

Geólogo
Andrés Felipe Gallego Rios
Consortio Llanos Orientales
Geoand22@hotmail.com
Bogotá, D.C. – Colombia

REF: Resultados Análisis de Difracción de rayos X –Consortio Llanos Orientales

Estimado Geólogo Andrés:

Gracias por usar los servicios analíticos de GMAS. Agradecemos su confianza así como sus sugerencias para la mejora de la calidad y eficiencia de nuestro servicio.

A continuación encuentra el reporte final de los resultados de difracción de rayos X, análisis llevados a cabo en 24 muestras, por favor no dude en contactarnos si tiene alguna pregunta.

Cordialmente,



CLEMENCIA GOMEZ
Geóloga PhD
GMAS SAS
Teléfono (+571) 2357568 Ext. 114

GMAS S.A.S. LABORATORIO DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y GEOQUÍMICA.
Departamento de Difracción de Rayos X

Informe: **GMR-0546**

Fecha de Entrega: Marzo 12 de 2014

TABLA DE CONTENIDO

1. INSTRUMENTACIÓN Y PARÁMETROS.....	3
2. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN	3
3. PROCEDIMIENTO DE CUANTIFICACIÓN.....	3
4. RESULTADOS	5
5. DIFRACTOGRAMAS.....	7
6. BIBLIOGRAFÍA.....	23

1. INSTRUMENTACIÓN Y PARÁMETROS

Difractómetro Bruker D8 Advance -Serie I

Detector VANTEC-1 PSD

Tubo de rayos-X Co 1.9Kw (K alpha $\lambda = 1.799$)

Filtro de Hierro

35KV 30mA

Muestras en polvo: 2θ : 5° - 70° ; Muestras orientadas: 3.4° - 35°

Tamaño del paso: 0.016

Velocidad de barrido: 0.4 segundos por paso

2. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN

Para preparar la muestra en polvo, 5g de muestra fueron pulverizados hasta alcanzar tamaños menores a $44\mu\text{m}$ (Sieve # 325); posteriormente el polvo fue comprimido con una espátula sobre un portamuestras de aluminio y difractado (Zhang et al. 2003).

Para el análisis de minerales de arcilla, se hizo una suspensión de 3g de la muestra en polvo en 50ml de agua destilada, se agitó y se dejó reposar por 50 minutos. Con una pipeta se tomaron los primeros centímetros de la suspensión, se depositaron sobre un portamuestras de vidrio y se dejaron secar a temperatura ambiente. Con este tratamiento los minerales arcillosos se orientan preferencialmente sobre sus planos basales y se orientan. Esta preparación se difractó para obtener el patrón "Secado al aire" o "Air Dried".

La misma preparación fue solvatada con etilenglicol en un desecador por 5 horas después de hacer vacío –remoción del aire y reemplazamiento por vapores de etilenglicol-. Cuando pasaron 5 horas la muestra solvatada se difractó, obteniéndose el patrón "Glicolado" o "Ethylene Glycol".

Finalmente la misma preparación fue puesta en una mufla y calentada durante 4 horas. Después de esto se difractó, obteniendo el espectro "calcinado" o "Heated 550°C ". (Thorez, 1976).

3. PROCEDIMIENTO DE CUANTIFICACIÓN

El método RIR para análisis cuantitativo también es conocido como flujo de matriz, debido a que la absorción de la matriz afecta la siguiente ecuación para análisis cuantitativo. En su forma más general la ecuación que define el método RIR es:

$$RIR_{i,s} = \left(\frac{X_s}{X_i} \right) \left(\frac{I_{(hkl)i}}{I_{(hkl)'s}} \right) \left(\frac{I_{(hkl)'s}^{rel}}{I_{(hkl)i}^{rel}} \right)$$

Donde X corresponde a la fracción en peso, I a la intensidad, Irel a la intensidad relativa y los subíndices i y s indican respectivamente la fase y la fase estándar o de calibración.

Cuando la fase estándar es corindón y la proporción es determinada de acuerdo con la convención de la línea más intensa del corindón I(113) y de la línea más intensa de la fase estudiada i, I(hkl) en una mezcla 50:50 por peso, Los valores RIR son conocidos como I/I_{cor} o RIR_{cor}. En términos de RIR_{cor} la concentración de cualquier fase i en una muestra mezclada con una cantidad conocida de corindón está dada por:

$$X_i = \left(\frac{X_{cor}}{RIR_{cor}} \right) \left(\frac{I_{(hkl)i}}{I_{(113)cor}} \right)$$

Chung (1974) reconoció que si todas las fases en una mezcla son conocidas y sus RIR son conocidos también, entonces la suma de todas las fracciones, de todas las fases debe ser igual a 1. Esto permite el establecimiento de un sistema de n ecuaciones para resolver las n fracciones de pesos sin la necesidad de la adición de una muestra *spike* a la muestra analizada, usando la siguiente ecuación:

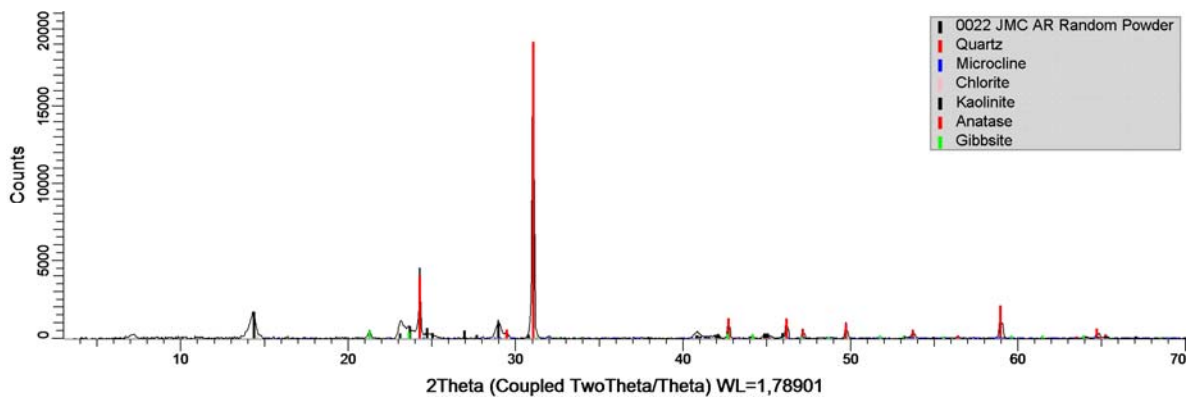
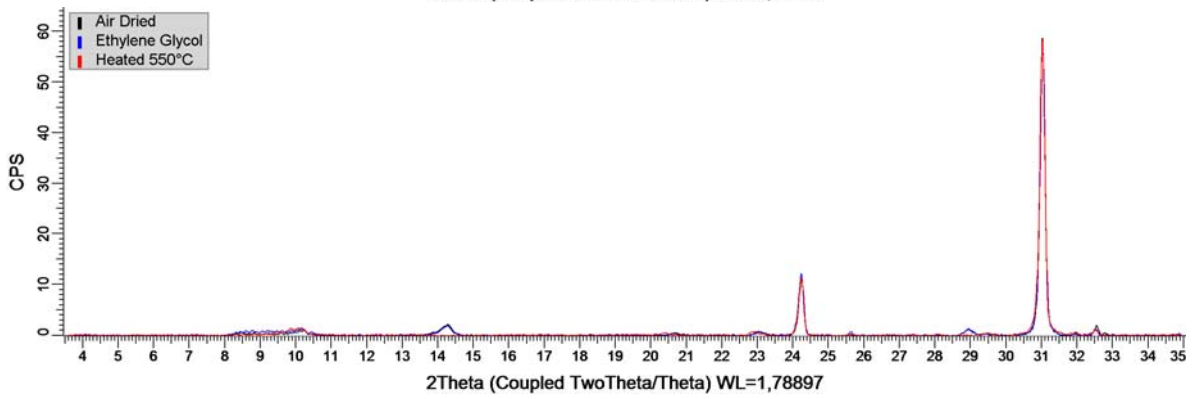
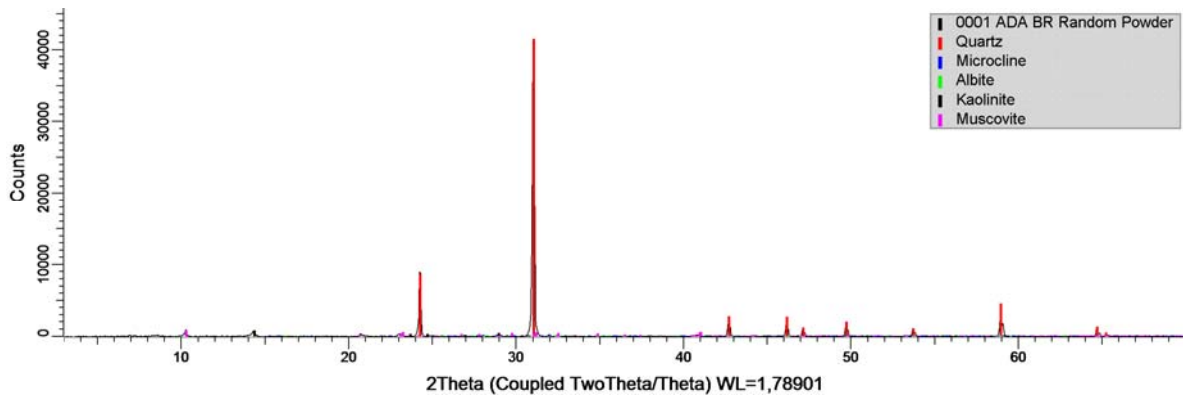
$$X_\alpha = \frac{I_{(hkl)\alpha}}{RIR_\alpha I_{(hkl)\alpha}^{rel}} \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^{\#phases} (I_{(hkl)j} / RIR_j I_{(hkl)j}^{rel})} \right]$$

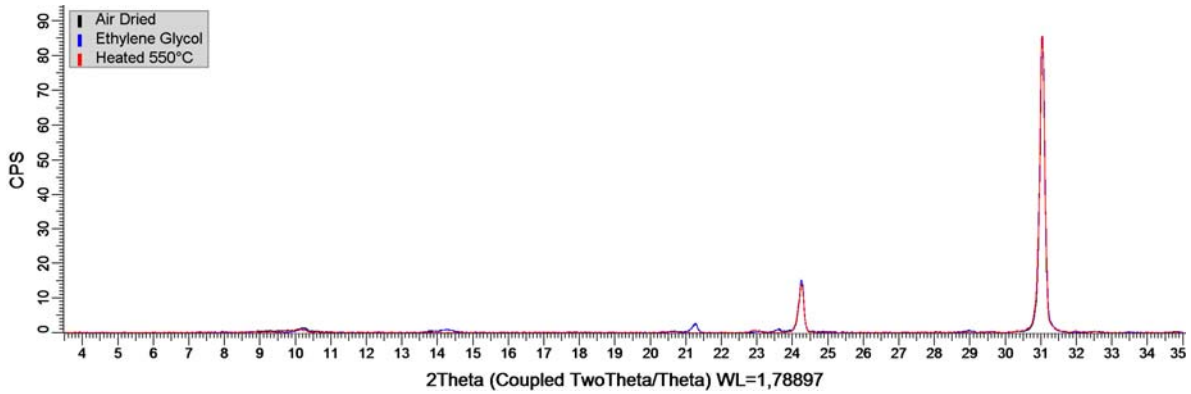
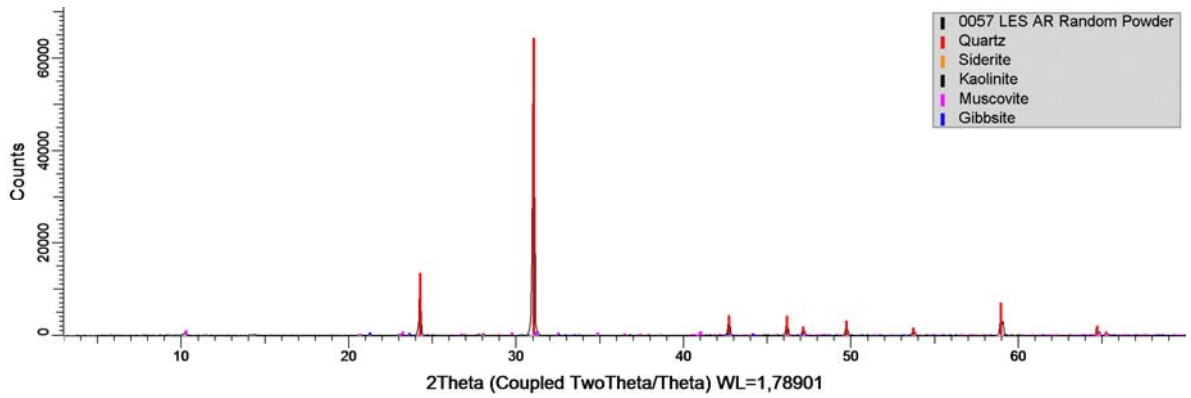
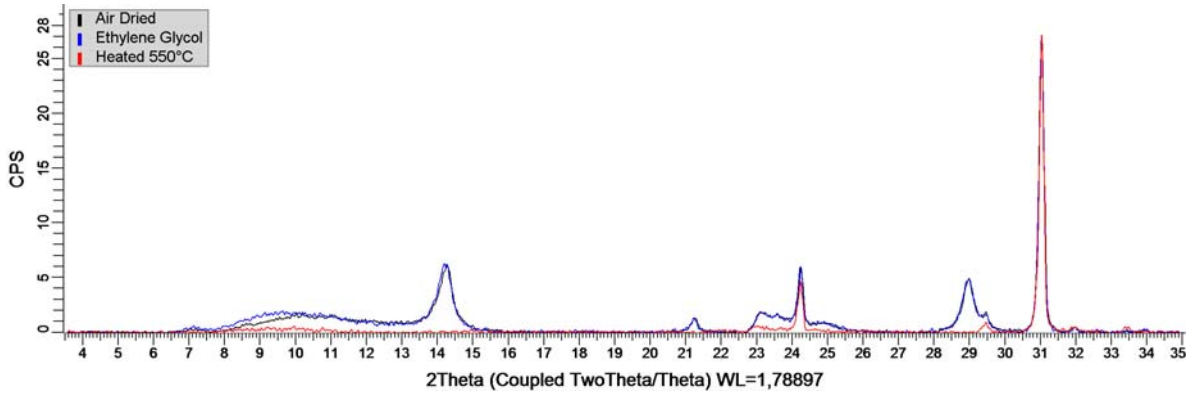
4. RESULTADOS

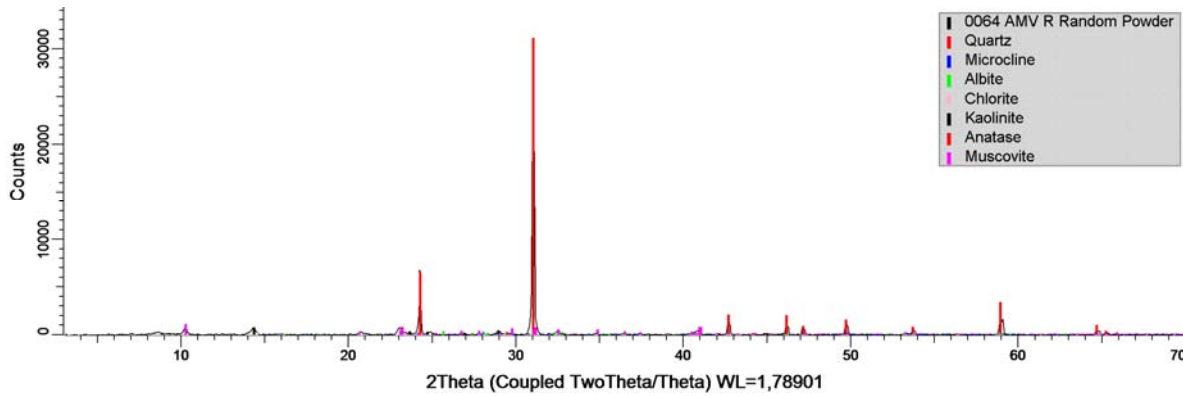
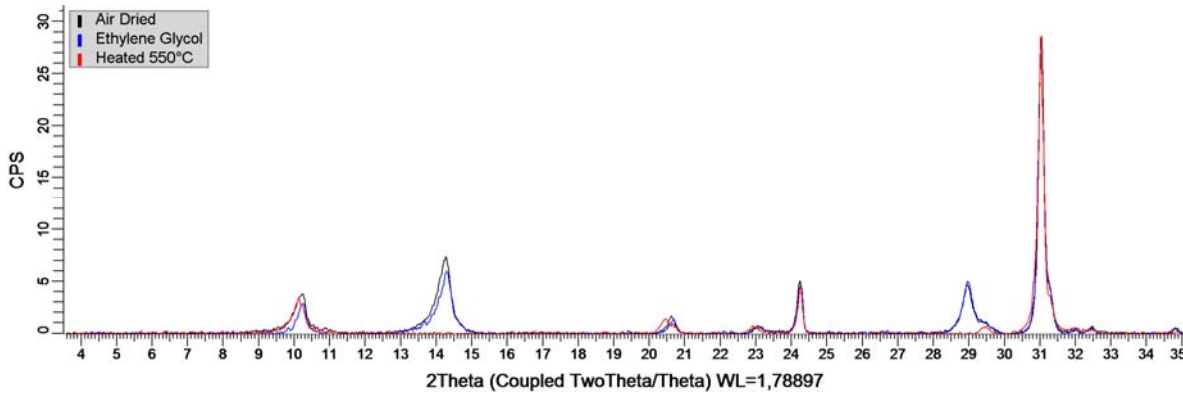
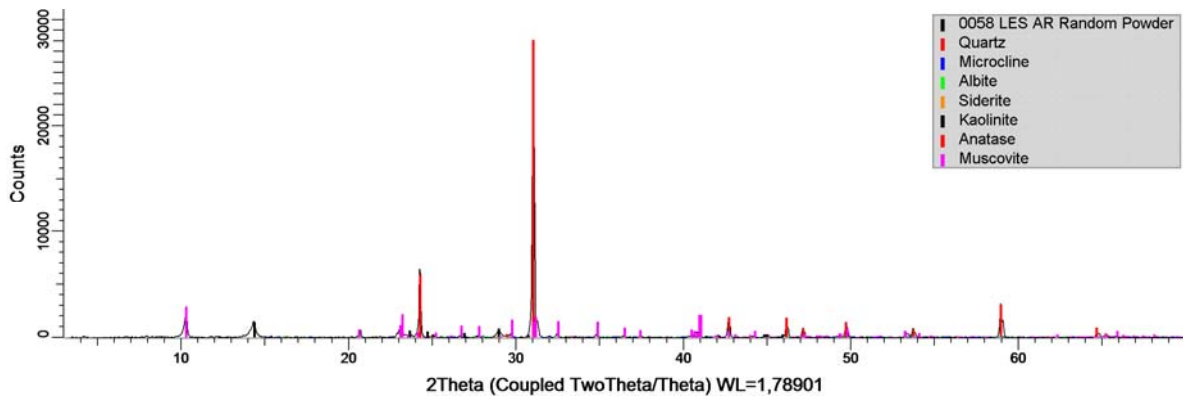
CONSORCIO LLANOS ORIENTALES	IDENTIFICACION														Total (%)
	OTROS									MINERALES DE ARCILLA					
Muestra	Siderita	Quarzo	Anatasa	Apatito	Goethita	Lepidocrocita	Gibbsita	K-Feldspar	Plagioclasa	Pirofilita	Illita Mica	I / Sm	Chlorita	Kaolinita	
ADA0001BR		82,2						0,6			7,0			10,2	100
ADA0088R		53,8		2,3			9,1	0,7	15,5				0,7	17,9	100
ADA0212BR		54,1		2,3				0,1			17,5	4,5		21,5	100
AMV0064R		75,8						0,2			11,5		0,4	12,1	100
AMV0185AR		49,2		2,7		2,0		0,2			19,4		0,7	26,2	100
AMV0185BR	2,8	40,4	1,3	2,3				0,0			35,8		0,2	17,2	100
CAM0261CR		68,0						0,2			5,0			27,3	100
CAM0294BR		49,2						0,2			10,6			39,9	100
CAM0294CR		43,0						0,2			10,2			46,6	100
CAM0562R		83,2						0,0			0,4			16,4	100
EGA0146R	2,2	15,7	0,2	2,2				0,2		5,2	10,7			63,4	100
EMB0205R		68,7					3,4	1,2	5,8					21,0	100
JMC0022AR		51,1					6,3	0,5	10,7				0,4	31,1	100
JMC0073R		63,1					2,1	0,8	3,7				0,5	29,8	100
JMC0376AR		51,2						0,8			9,9			38,1	100
LES0057AR	2,3	79,7	0,9				3,9	0,2	6,7		6,1			0,7	100
LES0058AR	2,6	54,2	0,8					0,3			23,9			18,3	100

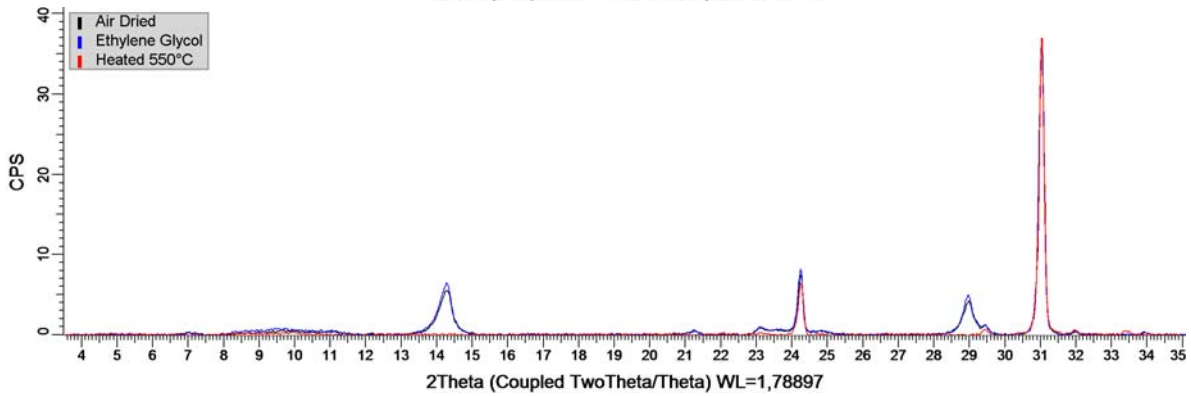
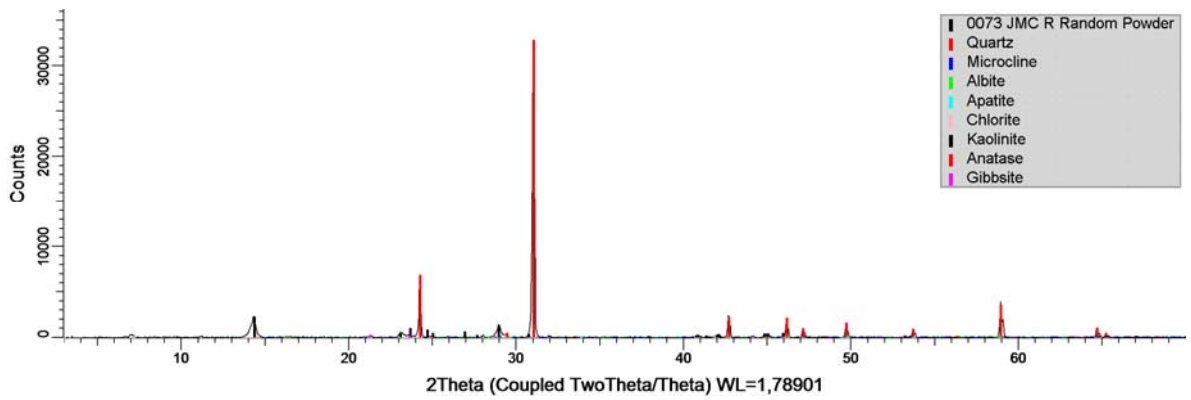
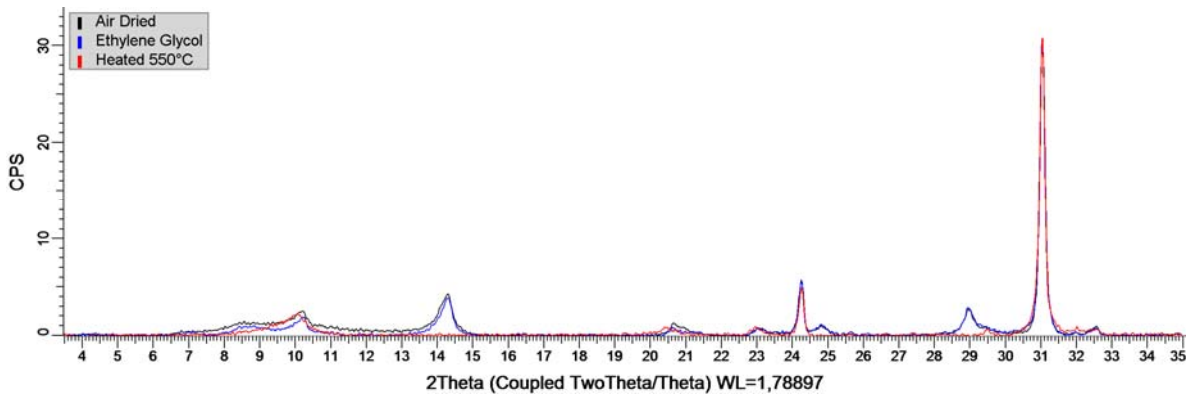
CONSORCIO LLANOS ORIENTALES	IDENTIFICACION														
	OTROS									MINERALES DE ARCILLA					Total (%)
Muestra	Siderita	Quarzo	Anatasa	Apatito	Goethita	Lepidocrocita	Gibbsita	K-Feldspar	Plagioclasa	Pirofilita	Illita Mica	I / Sm	Chlorita	Kaolinita	
RCP0119R		78,8						0,3						20,9	100
RIPO255ER		48,4			14,9		12,8	0,2	21,6					2,5	100
RIPO255R		35,6		2,5				0,3			6,0			55,6	100
RIPO337AR		60,9						0,2			3,5			35,9	100
RIPO337CR		58,1						0,5			10,1			31,3	100
RIPO386AR		100						0,2							100
RIPO386BR		91,5			8,8			0,2							100

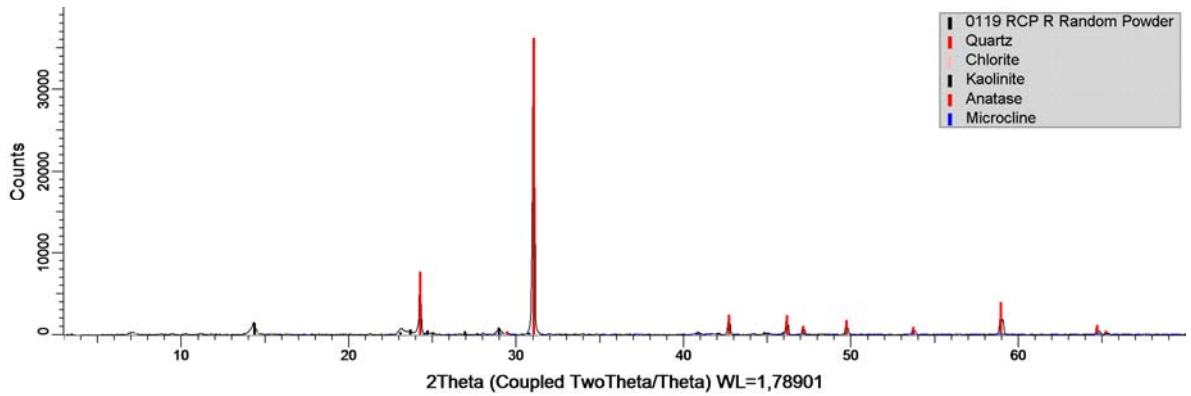
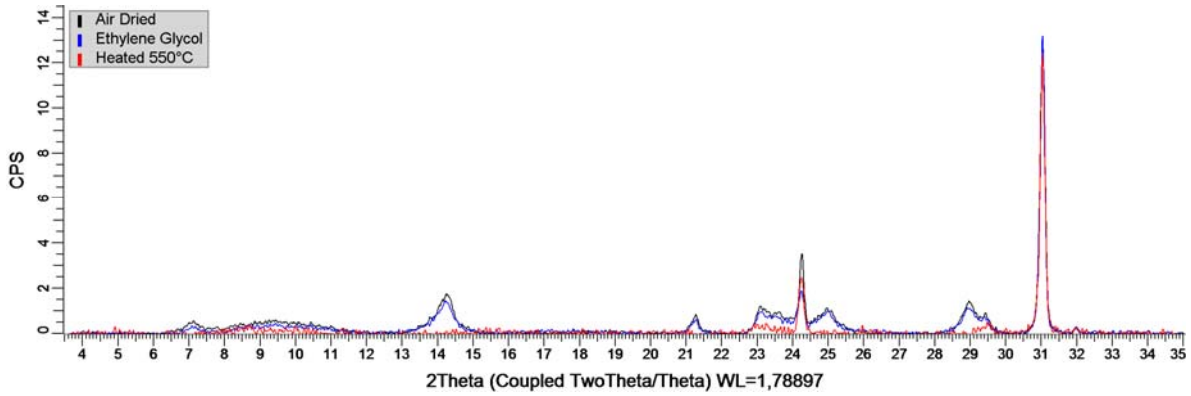
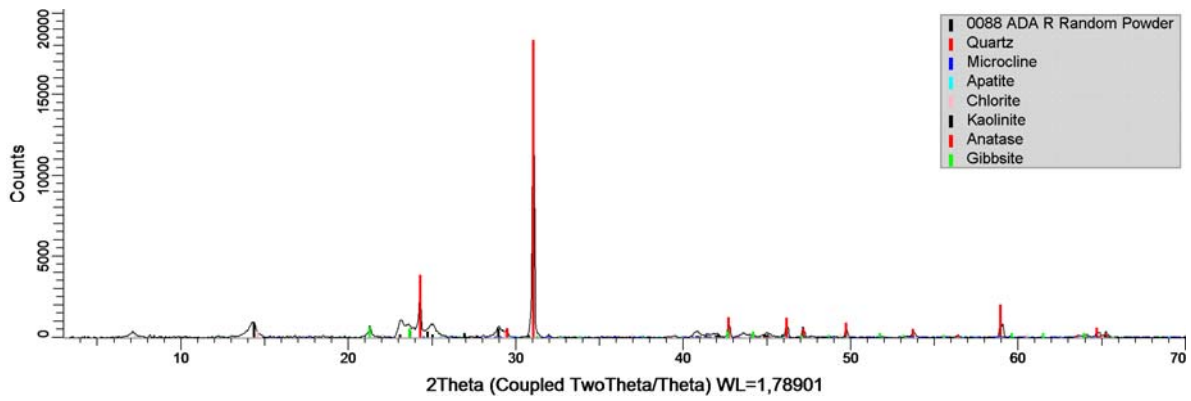
5. DIFRACTOGRAMAS

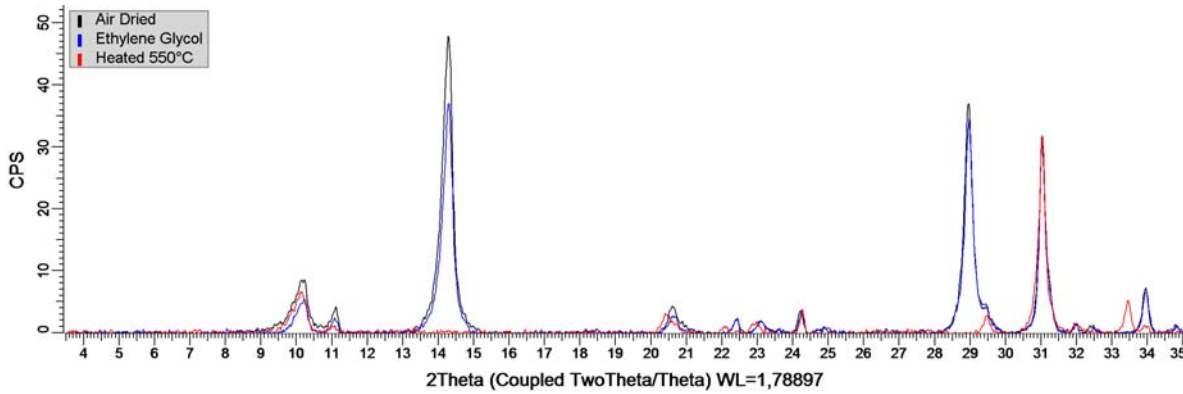
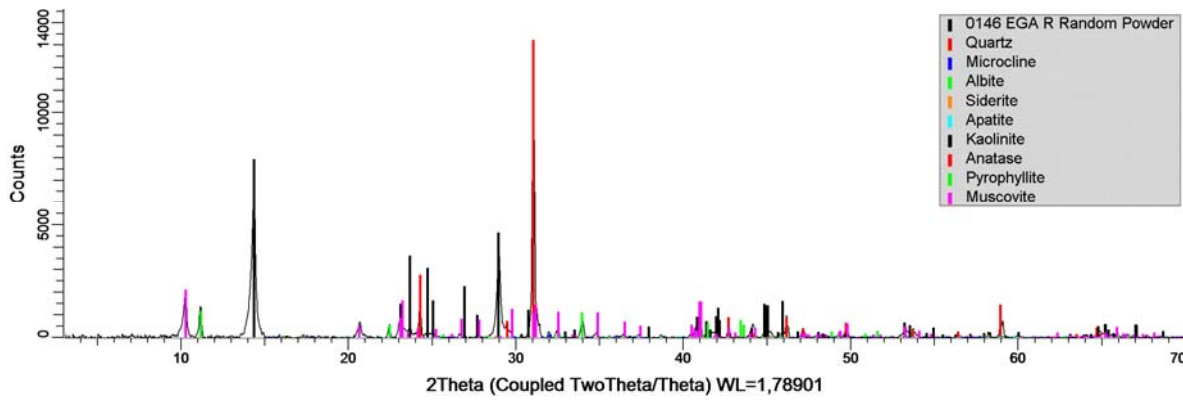
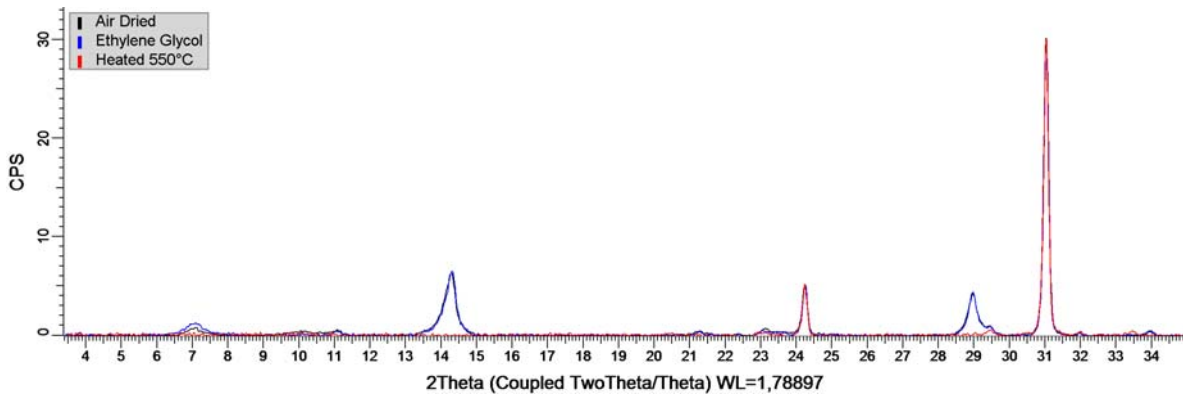


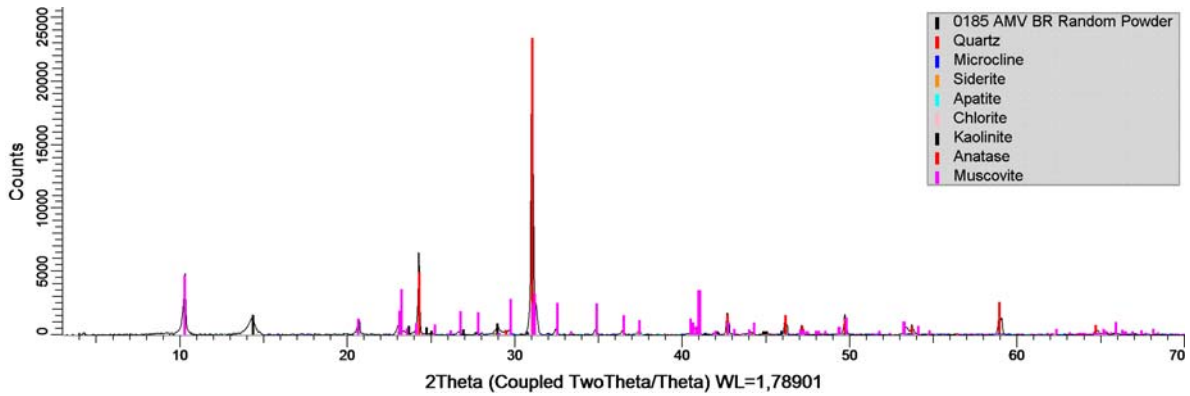
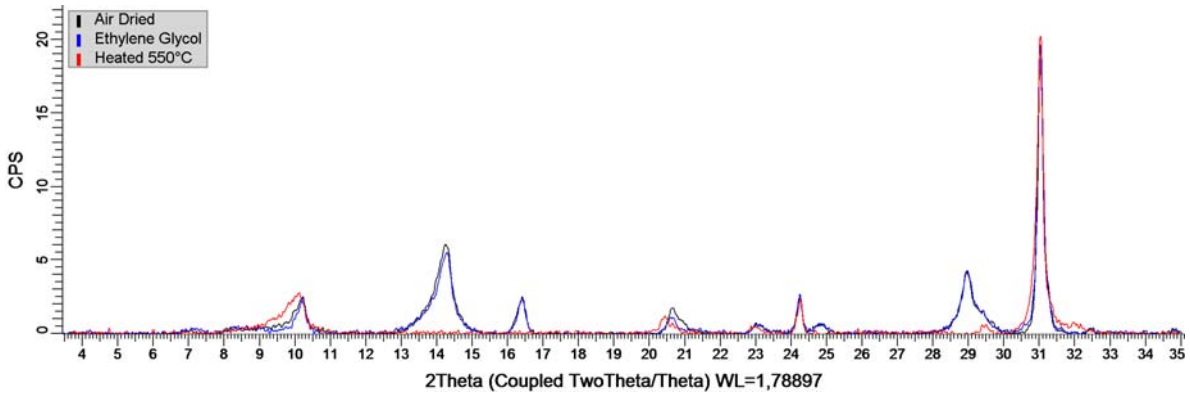
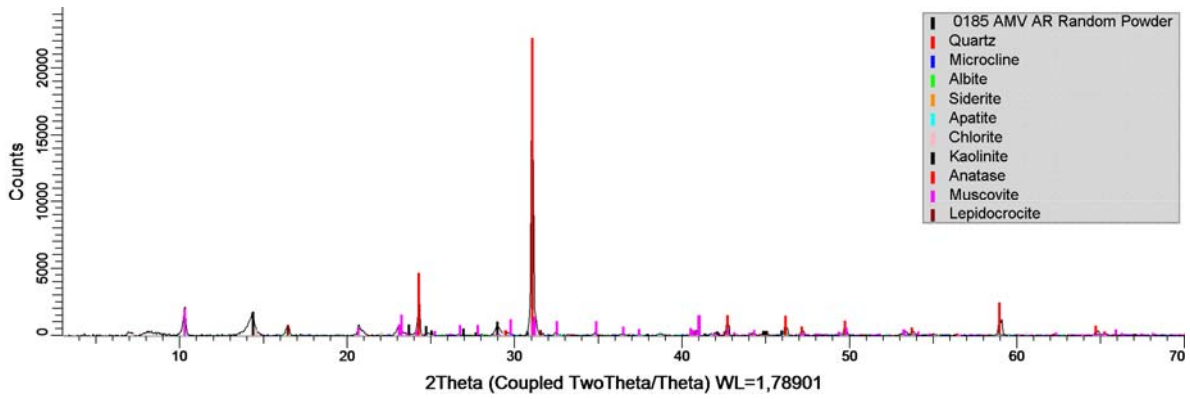


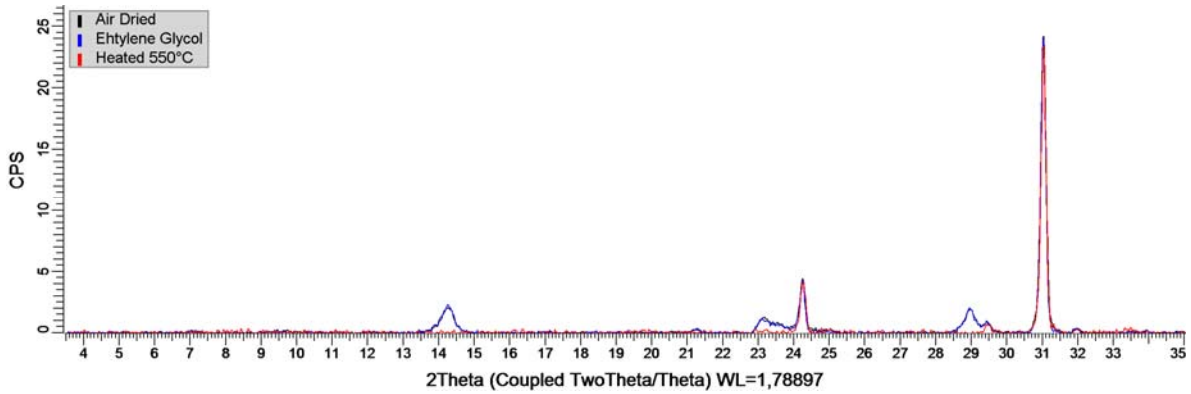
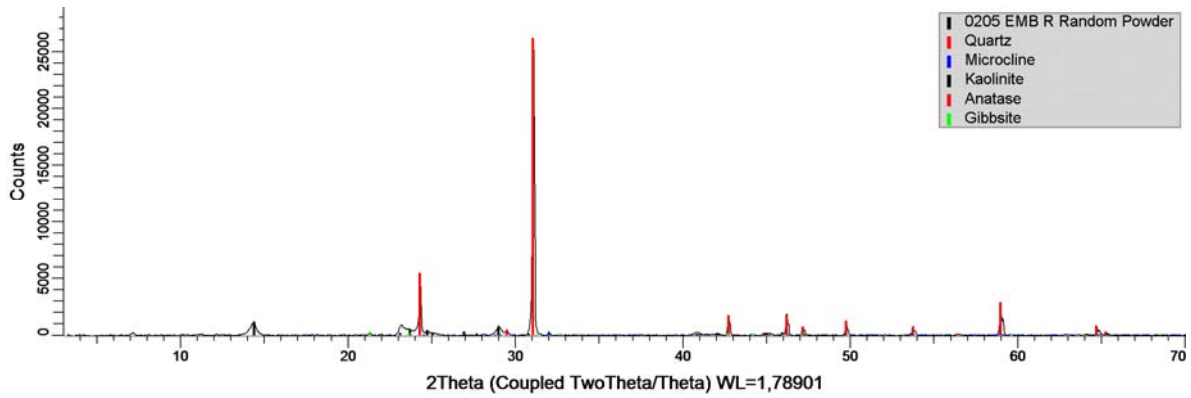
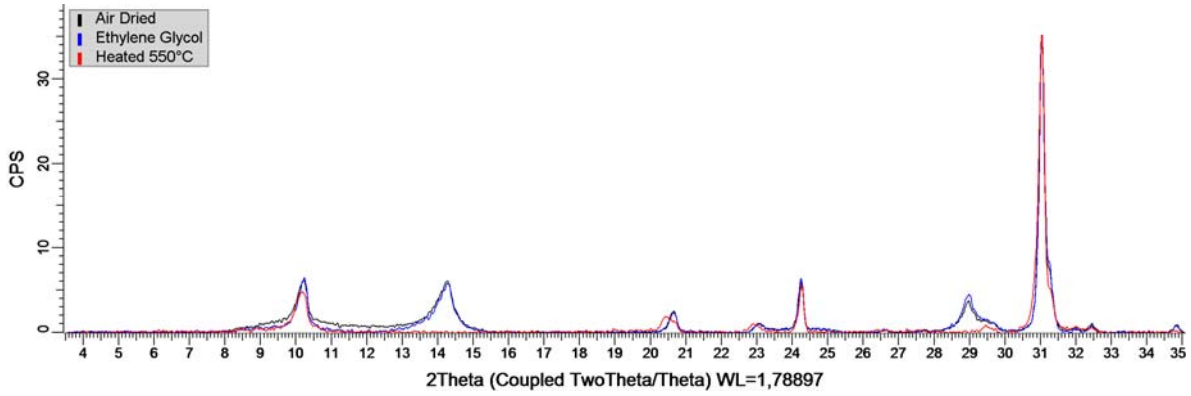


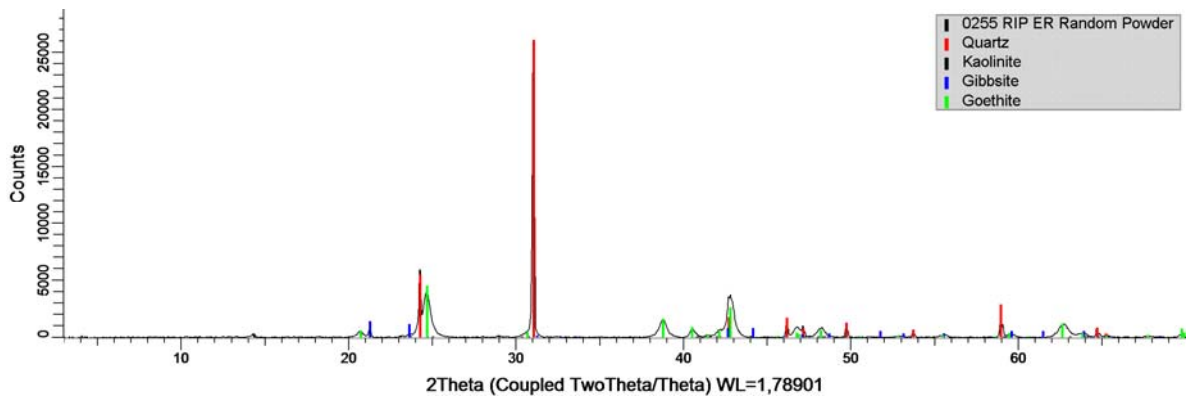
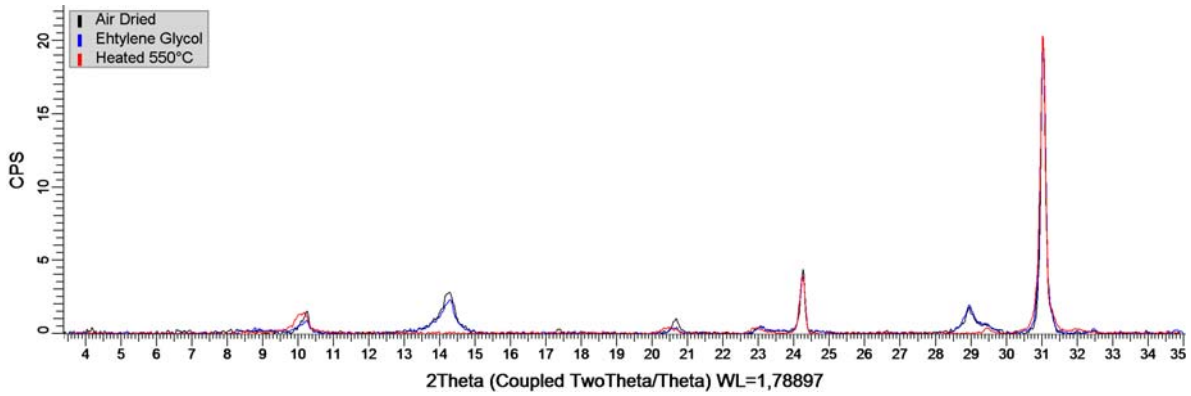
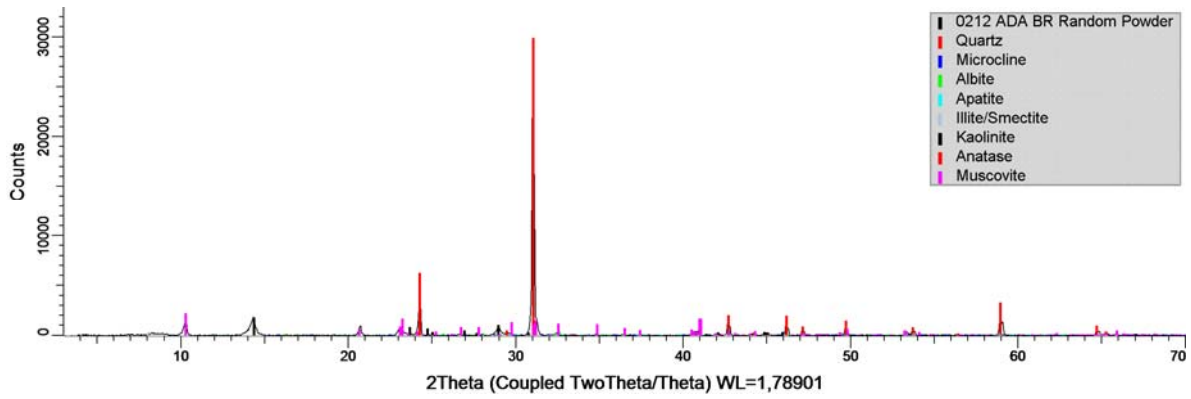


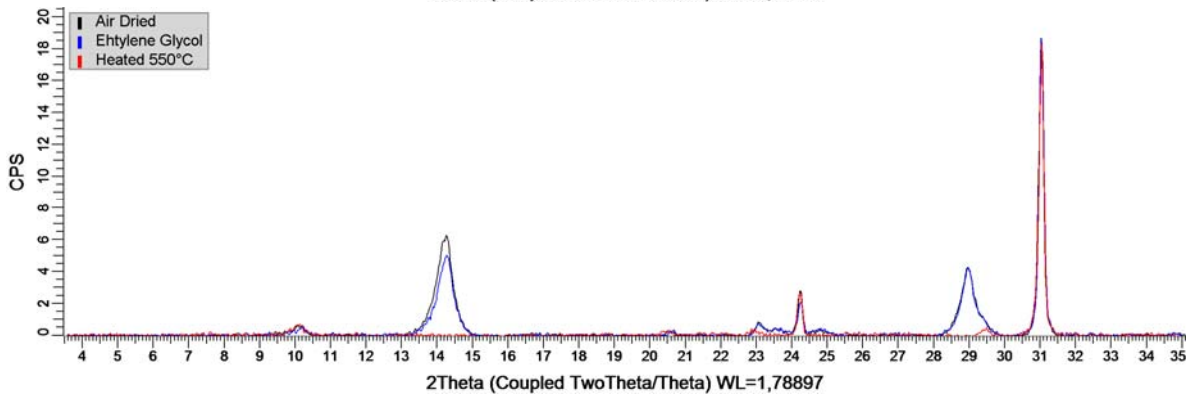
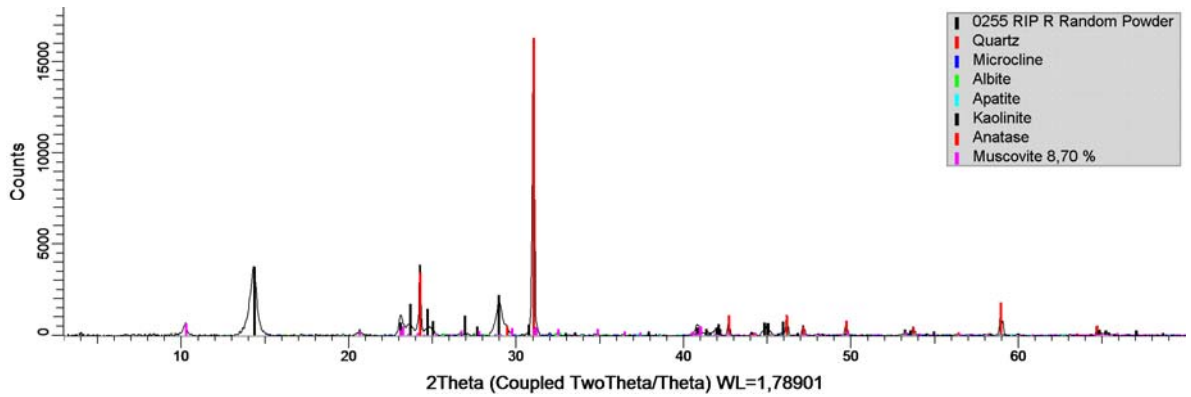
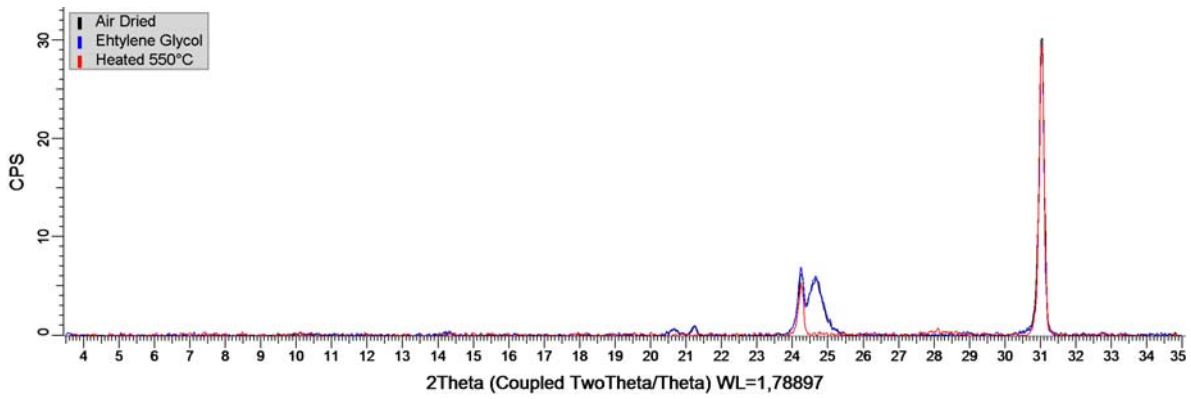


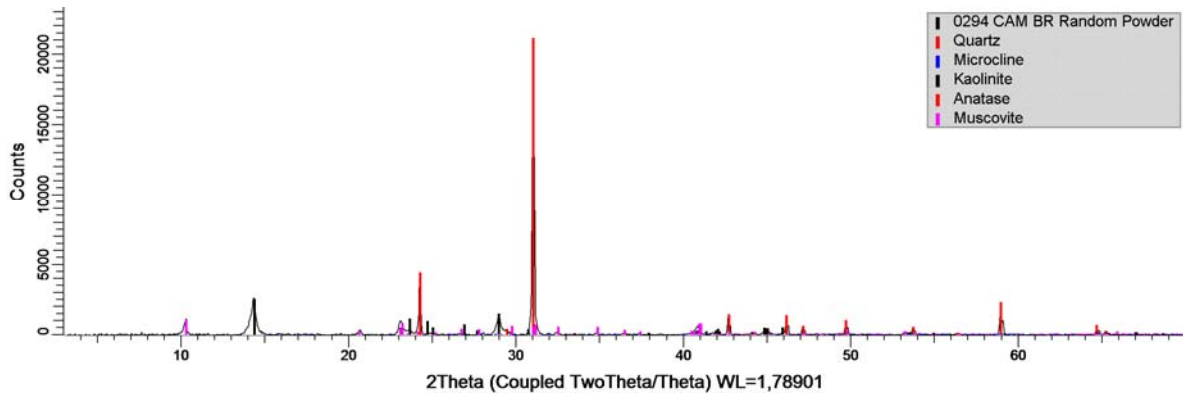
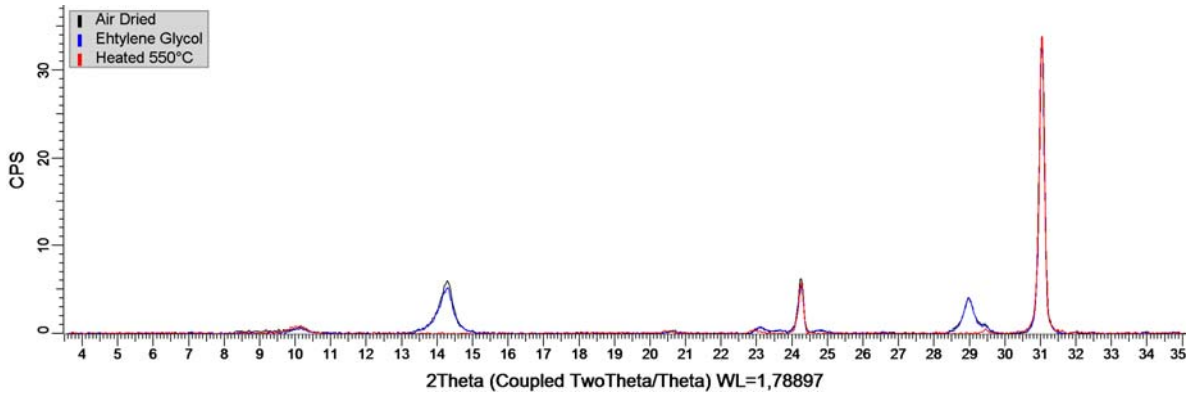
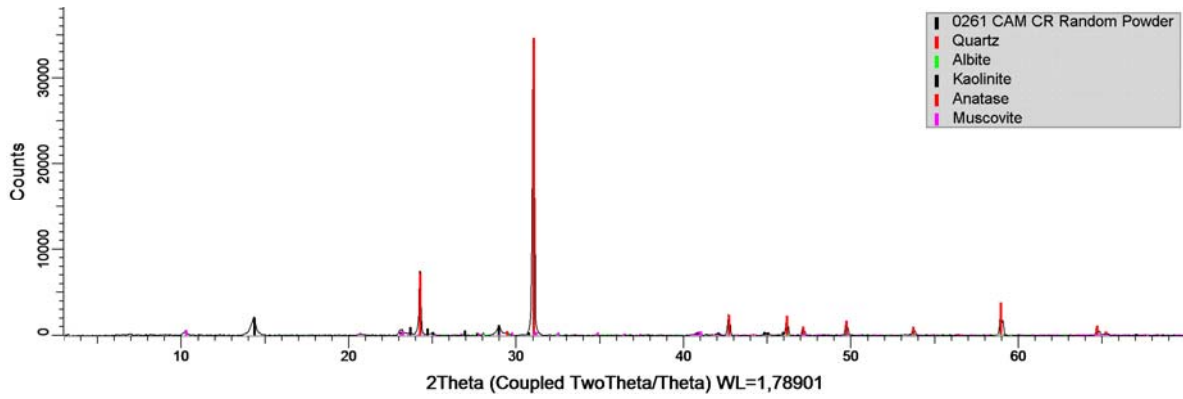


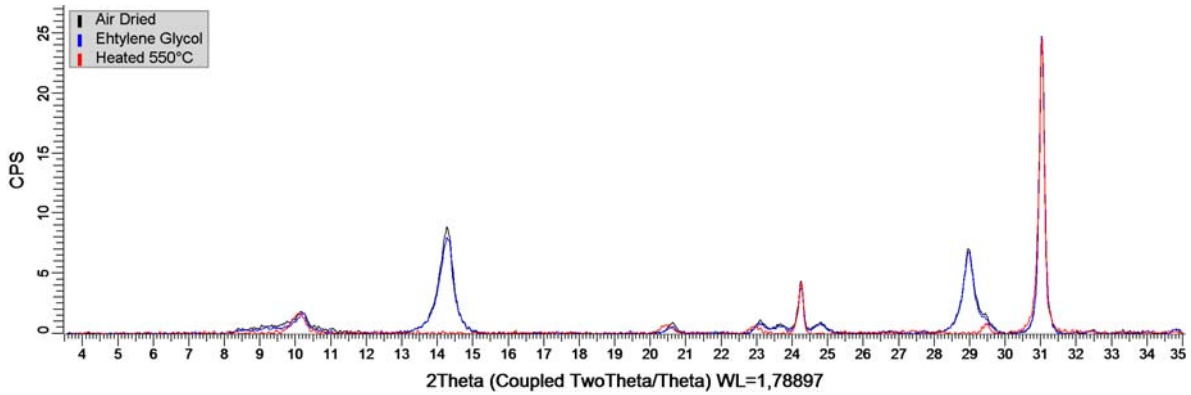
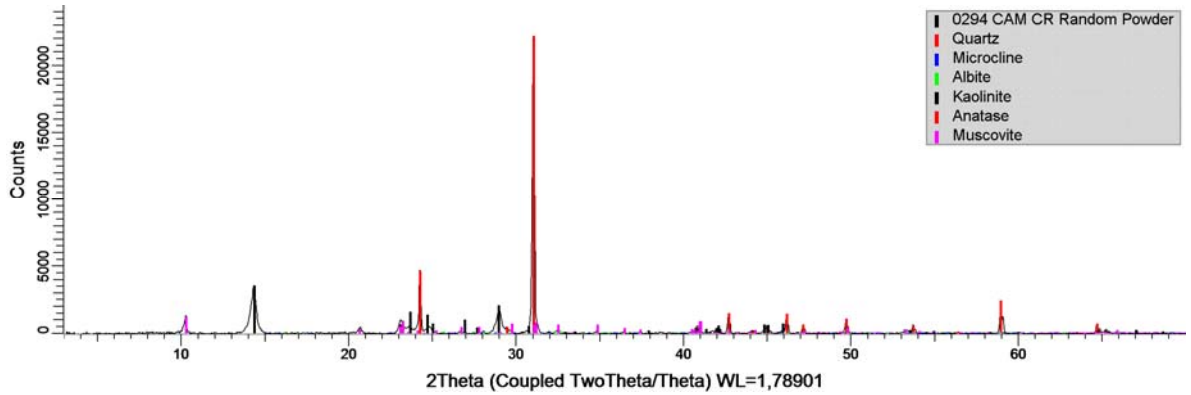
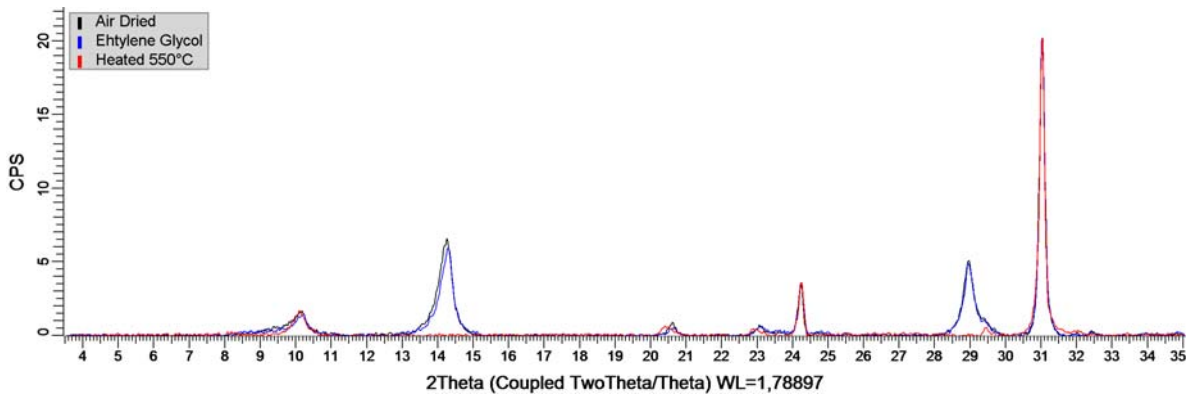


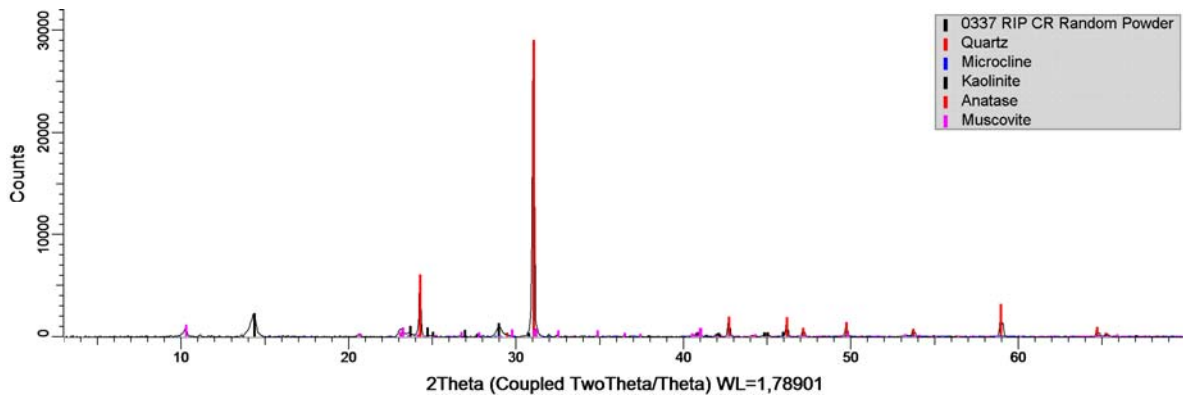
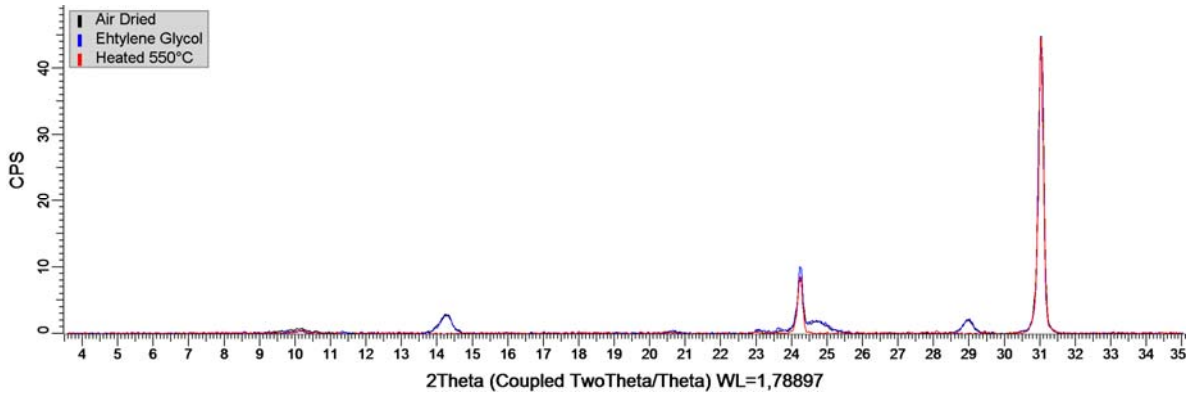
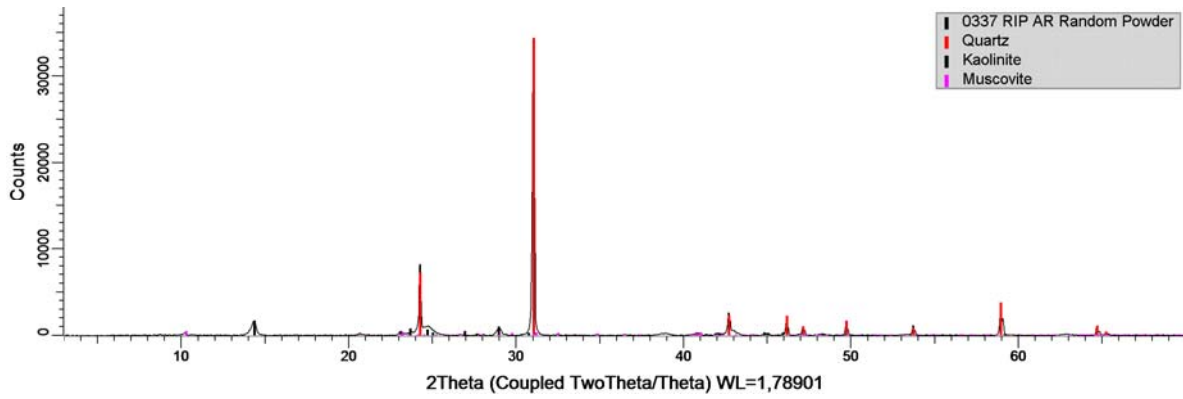


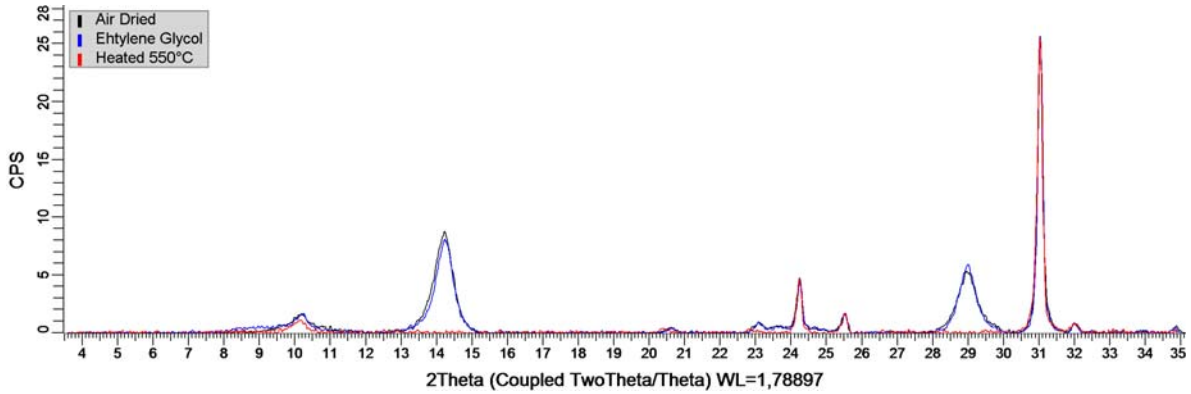
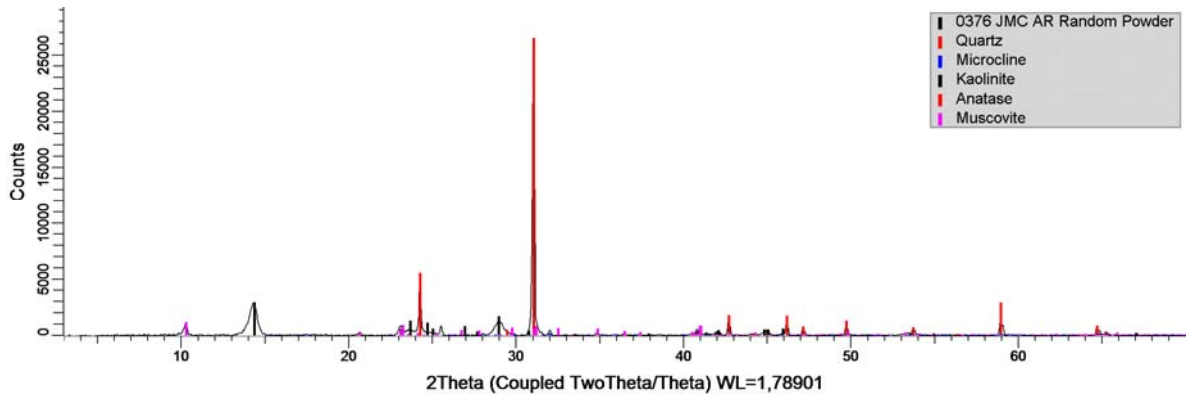
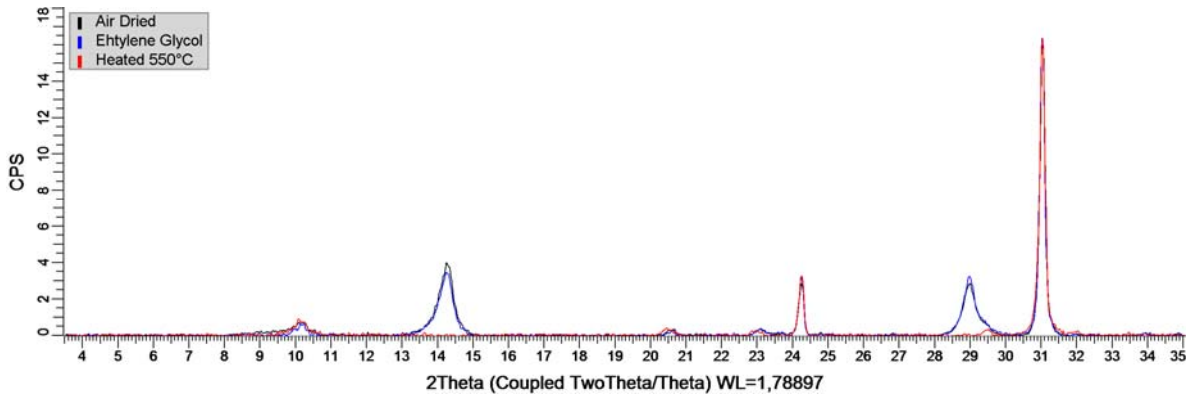


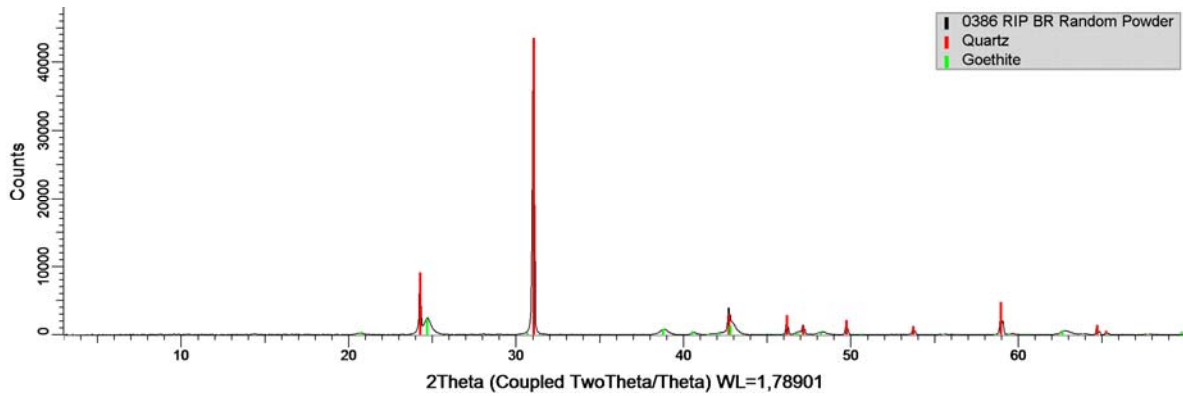
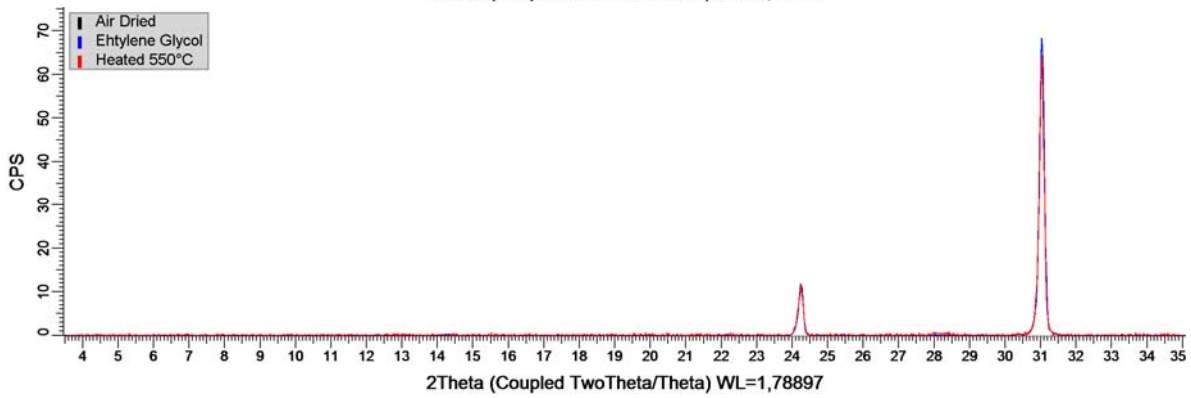
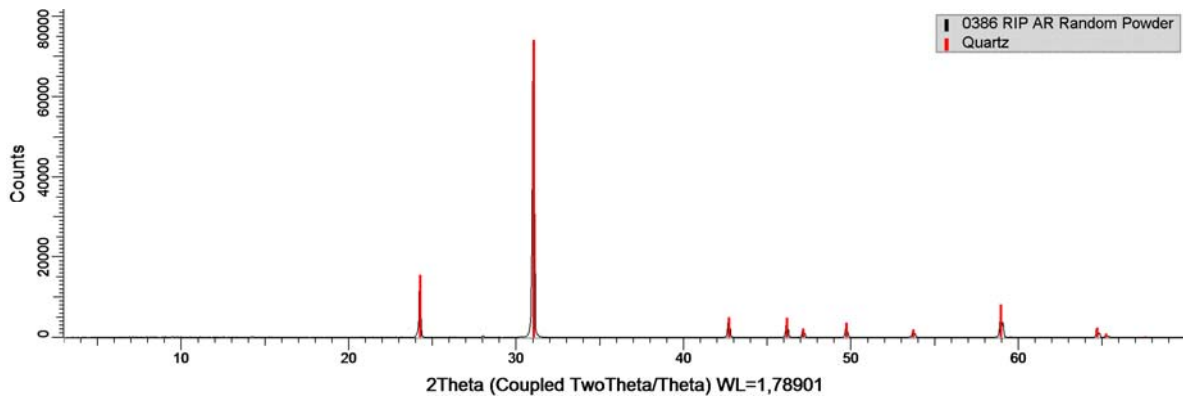


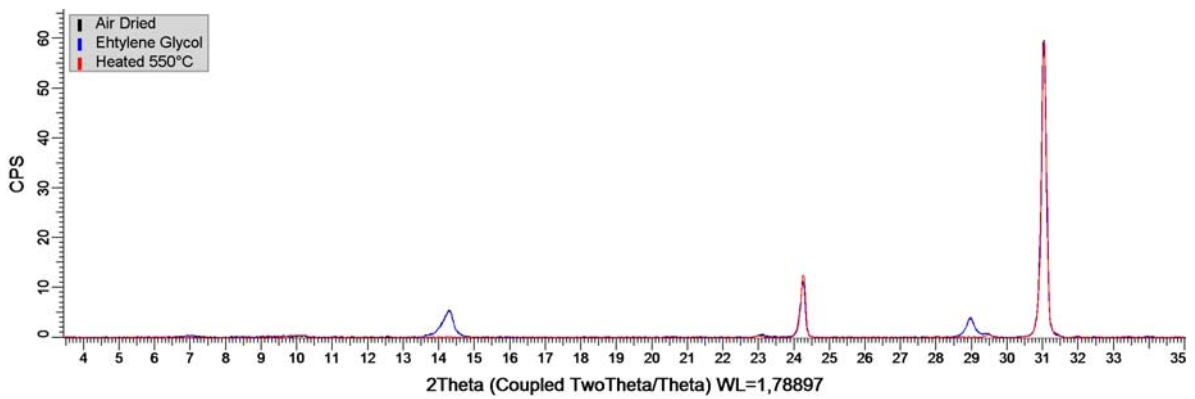
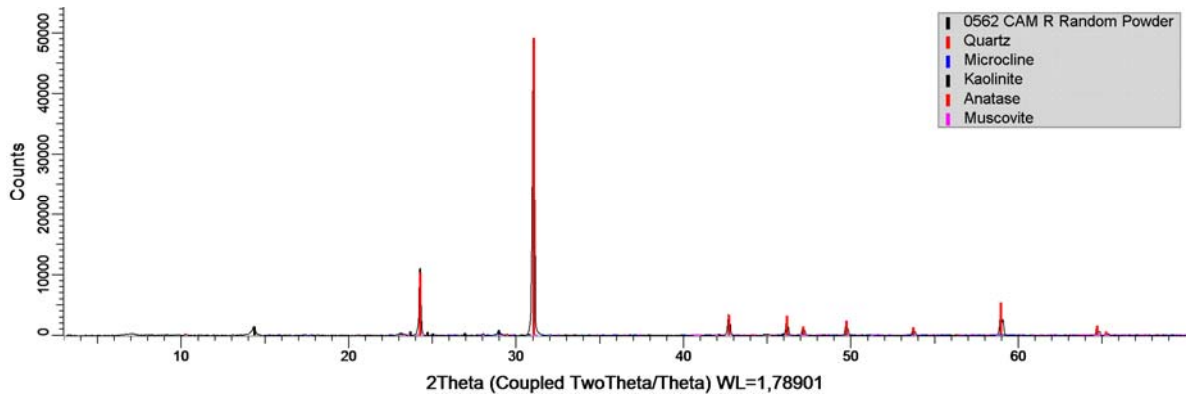
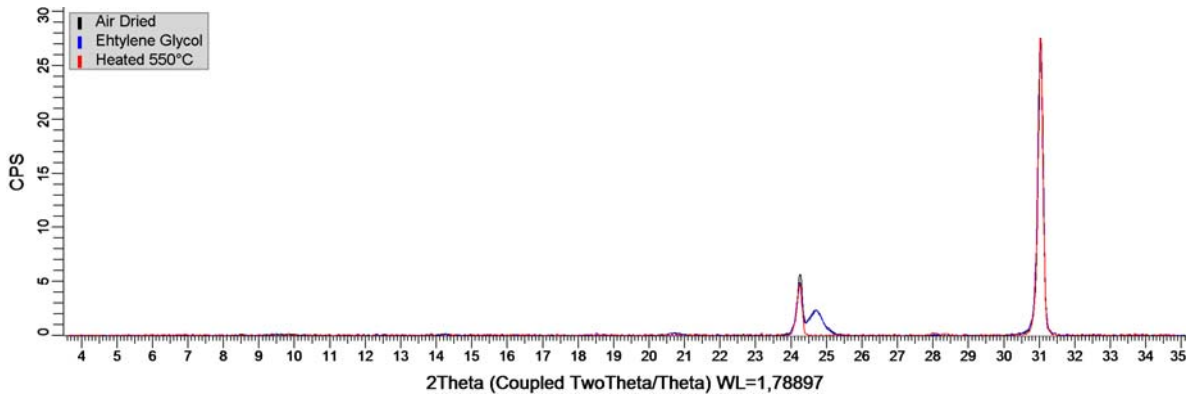












6. BIBLIOGRAFÍA

- Chipera S. & Bish D. *Baseline studies of The Clay Minerals Society source clays: Powder x-ray diffraction analysis*. Clays and clay minerals, Vol. 49, No. 5, 398-409, 2001.
- Moore D. & Reynolds R. *X-Ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press -Second Edition-, New York, 1997.
- Thorez J. *Practical identification of clay minerals*. Editions G. Lelotte, Belgium, 1976.
- www.webmineral.com
- Zhang G. et al. *A simple sample-mounting method for random powder x-ray diffraction*. Clays and Clay Minerals, Vol. 51, No. 2, 218–225, 2003.



ANÁLISIS DE MINERALES ARCILLOSOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X BLOQUE - 6 DEPARTAMENTO DEL VICHADA



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos	5
Metodología	5
CUANTIFICACIÓN DE MINERALES POR EL MÉTODO NORMALIZADO RIR	6
DETERMINACIÓN DE CRISTALINIDAD DE ILLITAS POR ÍNDICE DE KÜBLER (IK)	7
DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE REICHWEITA ILLITA/ESMECTITA (I/Sm)	8
ANÁLISIS DE CRISTALINIDAD DE CAOLINITAS (KPEI).....	9
3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	12
Formación Sejal.....	12
Muestreo XRD.....	12
Mineralogía.....	13
Formación Matavén.....	17
Muestreo XRD.....	17
Mineralogía.....	18
Terraza (N2t1, N2t2, N2t3 y N2t4)	19
Muestreo XRD.....	19
Mineralogía.....	20
Aluvial (N2a).....	22
Muestreo XRD.....	22
Mineralogía.....	23
Depósitos Aluviales recientes (Qal).....	24
Muestreo XRD.....	24
Mineralogía.....	25
Análisis general de la sección estudiada	26



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Espectro natural obtenido sin ningún tipo de tratamiento matemático. b) Espectro tratado con la función PseudoVoigt (ajuste lineal en rojo), en donde se muestra la deconvolución del espectro en los picos asociados a los minerales presentes y a su vez se muestra la medida del FWHM para el pico de Illita. (Bonilla, 2008).	8
Figura 2. Calibración interlaboratorios para ajuste de medidas de cristalinidad en Illitas (Índice de Kübler)	8
Figura 3. Variación en las relaciones Illita/Esmectita vs profundidad. Fuente: Hower (1981) en Meunier (2005).	9
Figura 4. a) Espectro natural obtenido sin ningún tipo de tratamiento matemático. b) Espectro tratado con la función PseudoVoigt (ajuste lineal en rojo), en donde se muestra la deconvolución del espectro, separando la fase alterada de la caolinita de la no alterada para obtener un FWHM limpio.	10
Figura 5. Modelo esquemático de distribución de Caolinitas según grado de cristalinidad en diversos ambientes sedimentarios.	11
Figura 6. Calibración interlaboratorios para ajuste de medidas de índices de caolinitas (KPEI)	11
Figura 7. Localización de las muestras en la columna generalizada para la Formación Sejal.	13
Figura 8. Modelo de fuentes de aporte general a partir de datos de Cristalinidad de Illitas (Índice de Kübler)	14
Figura 9. Identificación del mineral Erionita dentro de la muestra CAM-024.	15
Figura 10. Modelo general de Distribución de cristalinidad de Caolinitas (KPEI) dentro del área de estudio.	16
Figura 11. Porcentaje de Illita dentro de los interestratificados Illita/Esmectita (I/Sm).	17
Figura 12. Localización de las muestras en la columna generalizada para la Formación Matavén	18
Figura 13. Localización de las muestras para la unidad Terraza dentro de la columna generalizada.	20
Figura 14. Superposición de tratamientos en laminas orientadas mostrando el efecto de pilarización asociado al Aluminio (Al ³⁺) en las interlaminas de las Vermiculitas.	21
Figura 15. Modelo esquemático interpretativo de la evolución geomorfológica de la unidad terraza y las asociaciones paleoambientales en función de la mineralogía.	22
Figura 16. Localización de las muestras en la columna generalizada.	23
Figura 17. Localización de las muestras para los Depósitos Aluviales recientes dentro de la columna generalizada.	25
Figura 18. Distribución de las medidas de cristalinidad y % de Illita relacionadas con las condiciones de enterramiento de los minerales arcillosos. Nótese la repetitividad de las medidas para materiales de las diferentes unidades sedimentarias.	27
Figura 19. Variación Climática relativa en función de la mineralogía asociada a los paleosuelos presentes en cada una de las unidades analizadas.	29



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de muestras analizadas para la Formación Sejal.	12
Tabla 2. Relación de muestras analizadas para la Formación Matavén	18
Tabla 3. Relación de las muestras analizadas para la unidad Terraza.	19
Tabla 4. Relación de muestras analizadas para la unidad de Aluvial.....	22
Tabla 5. Relación de las muestras analizadas para los depósitos aluviales recientes	24



1. INTRODUCCIÓN

La abundancia de sedimentos finos (Lodos, Arcillas y Limos) constituyen cerca del 60 % de la carga total de sedimentos dentro de las cuencas, he allí donde el análisis de dichos materiales proporciona información valiosa en el entendimiento evolutivo de los diferentes ambientes sedimentarios y los procesos de transporte, aporte y enterramiento a que son sometidos. Siendo parte de los objetivos principales en la generación de modelos geológicos. La Difracción de Rayos X o XRD (*X Ray Diffraction*) es una de las herramientas más importantes para el estudio de los minerales constituyentes de los sedimentos finos y con la ayuda de las observaciones de campo y las nuevas tecnologías se convierte en un "martillo" para la geología moderna.

2. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar las propiedades de los minerales arcillosos y su relación con los medios sedimentarios.

Objetivos Específicos

- Determinar la relación entre los minerales arcillosos y los ambientes de depósito.
- Identificar la relación entre las posibles fuentes de aporte y los minerales presentes en las unidades arcillosas.
- Identificar los procesos diagenéticos a que hubiesen estado expuestos los minerales arcillosos.

Metodología

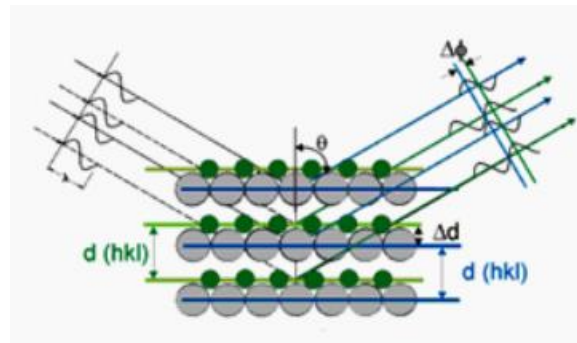
IDENTIFICACIÓN DE MINERALES POR XRD

La difracción de rayos X es un fenómeno físico que se refiere a cambios en las propiedades de longitud, amplitud y fase de las ondas electromagnéticas cuando interactúan con un cristal. Este fenómeno es el resultado de la dispersión de la onda cuando los rayos X chocan con los átomos de la estructura, siendo la longitud de onda y los espacios entre los átomos de los cristales dimensiones similares, alrededor de 10^{-8} cm (Å).



La interacción onda - materia produce una interferencia de la radiación que puede ser constructiva o destructiva. El primer caso se da cuando el frente de onda entra en fase y la señal producida se refuerza y puede ser medida. Lo anterior ocurre cuando el haz que incide sobre los planos cristalográficos, entra con un ángulo adecuado desde el punto de vista geométrico para producir una interferencia constructiva. Si el ángulo no es el correcto la interferencia es destructiva y no se observa señal.

La ley de Bragg pone en relación el ángulo de incidencia del haz de rayos X sobre el cristal y la distancia entre planos, de manera que las señales constructivas ocurren cuando se cumple la siguiente ecuación:



$$n \lambda = 2d \text{ sen}\theta$$

La identificación de los minerales en la muestra se soportan con las medidas de los picos identificados en la base de datos PDF2.

CUANTIFICACIÓN DE MINERALES POR EL MÉTODO NORMALIZADO RIR

Chung (1974), reconoció que si todas las fases en una mezcla mineral son conocidas y si se conocen todos los RIR (*Reference Intensity Ratios*) incluidos en las bases de datos PDF2 para cada una de las fases, entonces la suma de todas las fracciones debe ser igual a 1. Esto permite la escritura de un sistema de n ecuaciones para resolver las n fracciones en peso dentro de la sumatoria siguiendo la ecuación:

$$X_{\alpha} = \frac{I_{(hkl)\alpha}}{RIR_{\alpha} I_{(hkl)\alpha}^{rel}} \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^{\# \text{phases}} (I_{(hkl)j} / RIR_j I_{(hkl)j}^{rel})} \right]$$



DETERMINACIÓN DE CRISTALINIDAD DE ILLITAS POR ÍNDICE DE KÜBLER (IK)

Para la determinación de las condiciones diagenéticas que afectaron una secuencia sedimentaria en particular durante su historia de enterramiento, se aplicó el concepto de grado de cristalinidad o índice de cristalinidad, con el cual se asume que a medida que aumenta la profundidad, los parámetros de la red cristalina en cierto tipo de minerales se ven mejorados como una especie de camino hacia la forma cristalina ideal, producto de los cambios de presión y temperatura (en especial de temperatura) durante el enterramiento, este es el caso de los cristales de Illita y su relación en profundidad respecto a la presencia de Esmectita (Warr & Rice, 1994). Estas propiedades permiten ubicar un mineral de Illita dentro de una historia térmica siempre y cuando no haya sido afectado al 100% por los procesos de meteorización.

Para describir los perfiles experimentales se aplicó la función Pseudo – Voigt (PSV), que resulta de una superposición aditiva de parámetros Gaussianos (**G**) y Lorentzianos (**L**) que tienen en cuenta microdeformación y tamaño del cristalito, adicionalmente un parámetro fraccional η relacionando el radio de la intensidad del pico de G y L (Will, 2006):

$$\text{PSV} = \text{G} + \eta\text{L}$$

Los valores a obtener para definir las condiciones de enterramiento corresponden al ensanchamiento del pico a la altura media del mismo (FWHM), esta medida se logra aplicando la función PseudoVoigt y permite discriminar fases minerales no deseadas (Por ejemplo: Illitas Meteorizadas) dentro de la medida (Figura 1).

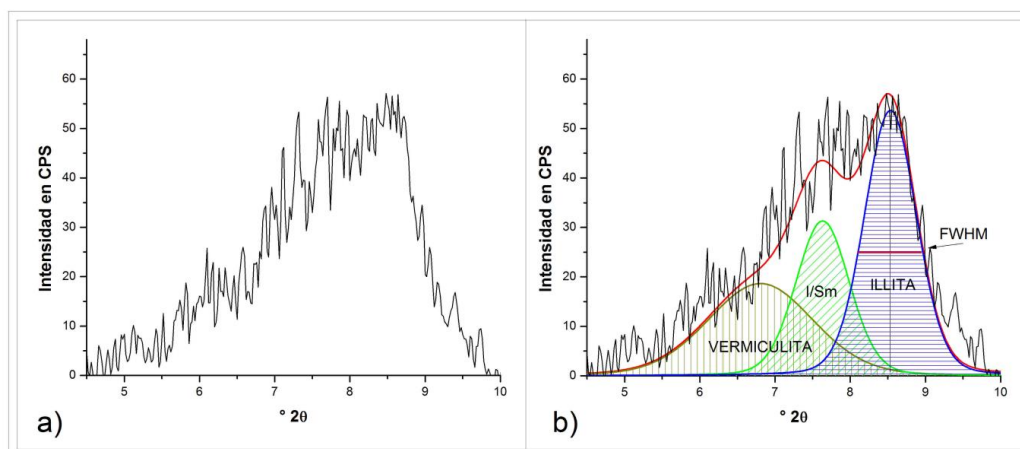


Figura 1. a) Espectro natural obtenido sin ningún tipo de tratamiento matemático. b) Espectro tratado con la función PseudoVoigt (ajuste lineal en rojo), en donde se muestra la deconvolución del espectro en los picos asociados a los minerales presentes y a su vez se muestra la medida del FWHM para el pico de Illita. (Bonilla, 2008).

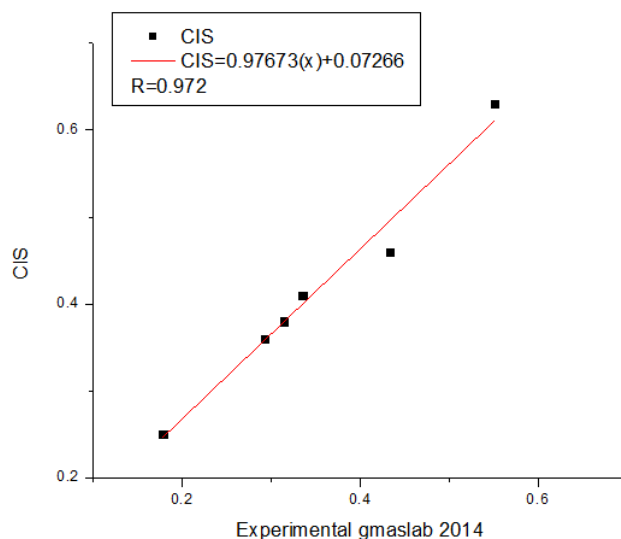


Figura 2. Calibración interlaboratorios para ajuste de medidas de cristalinidad en Illitas (Índice de Kübler)

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE REICHWEITA ILLITA/ESMECTITA (I/Sm)

Moore & Reynolds (1997), hacen referencia al análisis en la zona de los interestratificados en donde las relaciones de Illita y Esmectita en el interestratificado se pueden semicuantificar dependiendo de la posición de la segunda reflexión del pico de Esmectita (002) en la zona entre los 9 y los 10° 2θ en el



espectro saturado con Etilen Glicol (EG), esta posición estará en función de la cantidad de Illita presente en el interestratificado y a su vez relacionada directamente con las condiciones de enterramiento de la muestra.

Para los primeros estados de transformación diagenética, las Illitas forman estructuras interestratificadas organizadas de manera aleatoria con la Esmectita. Los progresos en las reacciones y el empaquetamiento en la secuencia, comienza a ordenar estos interestratificados y los valores de Illita en los mismos empiezan a incrementarse, esto permite relacionar estos cambios con la historia de enterramiento de las rocas que contienen estos minerales y establecer tanto la profundidad como la temperatura alcanzada (Figura 3).

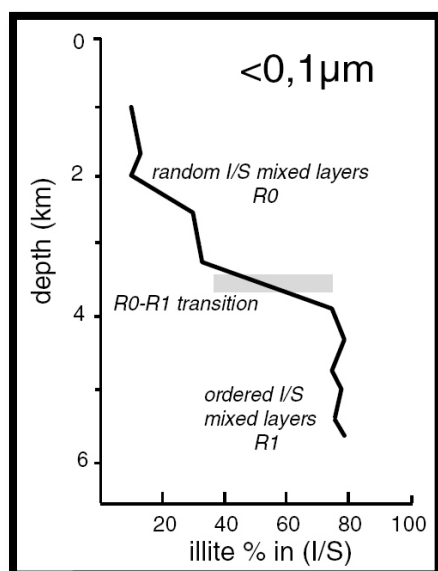


Figura 3. Variación en las relaciones Illita/Esmectita vs profundidad. Fuente: Hower (1981) en Meunier (2005).

ANÁLISIS DE CRISTALINIDAD DE CAOLINITAS (KPEI)

Según Besoain (1985), la caolinita tiene una capacidad de intercambio catiónico (CIC) bajo, del orden de 5 a 15 meq/100g. gran parte de este valor se produce en las uniones Si – O – Al situadas en los bordes de fractura del cristal; es fuertemente dependiente del pH y reversible, de modo que la carga es negativa en un medio básico, positiva en un medio ácido y cero entorno a la neutralidad; siendo así, las caolinitas que se transportan y depositan en medios continentales se mantienen en suspensión en un medio ácido y al momento de entrar en contacto con el agua de mar sufren una floculación inmediata por efecto de neutralización de cargas, aunque la floculación se produce esta no afecta a la totalidad de las caolinitas dentro del medio de transporte lo que genera una selección en las diferentes especies cristalinas del mismo mineral; por otra parte los cristales de caolinita corresponden a los de mayor



tamaño dentro del grupo de los minerales arcillosos, razón por la cual la energía del medio también resultará influyente en las características del cristal a depositar según las condiciones del mismo.

Para obtener una medida clara de la cristalinidad de la Caolinita, se toma el pico de 7\AA de cada caolinita presente en las muestras, se realiza una deconvolución matemática del espectro con el fin de identificar el pico asociado al mineral, descartando el efecto de fases abiertas producto de la meteorización actual o de planos de cristalinidad superpuestos asociados a minerales con estructuras similares.

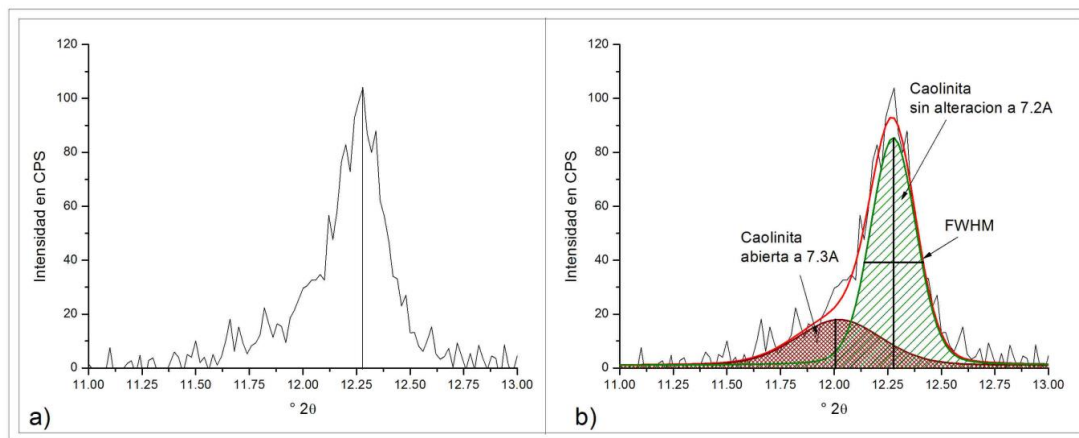


Figura 4. a) Espectro natural obtenido sin ningún tipo de tratamiento matemático. b) Espectro tratado con la función PseudoVoigt (ajuste lineal en rojo), en donde se muestra la deconvolución del espectro, separando la fase alterada de la caolinita de la no alterada para obtener un FWHM limpio.

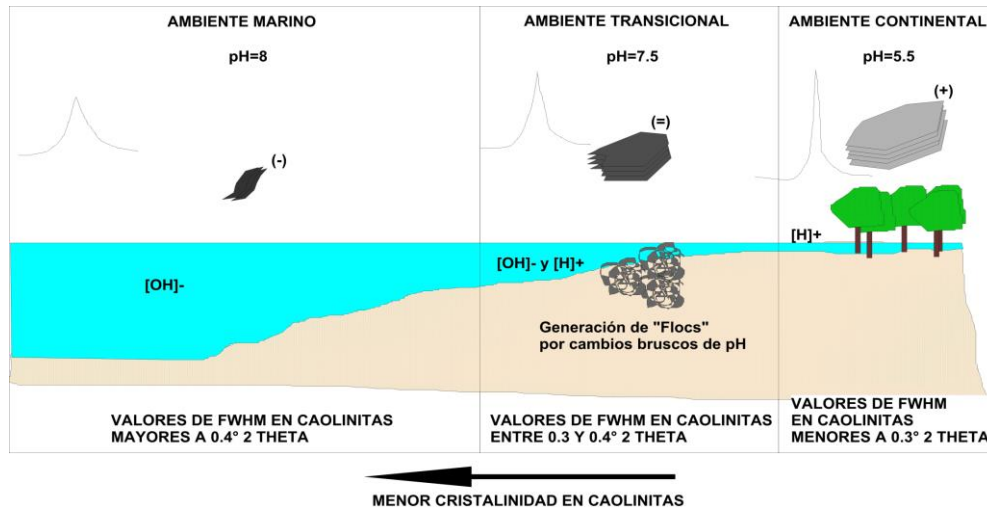


Figura 5. Modelo esquemático de distribución de Caolinitas según grado de cristalinidad en diversos ambientes sedimentarios.

Para poder establecer los rangos de medida dentro del modelo generalizado, se procedió a la calibración mediante las medidas de los FWHM de 6 muestras de calibración que corresponden a cada uno de los ambientes representativos localizados dentro del Grupo Guadalupe (Kg), la Formación Guaduas (TKg) y de la Formación Cacho (Tc). De los resultados de las medidas se obtiene la siguiente gráfica de calibración con su respectiva fórmula.

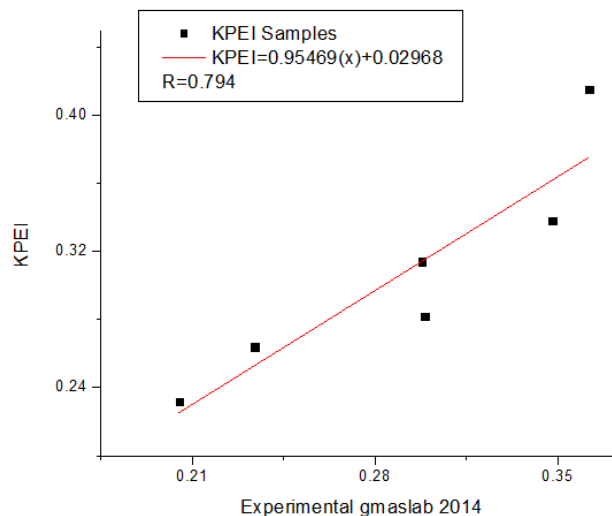


Figura 6. Calibración interlaboratorios para ajuste de medidas de índices de caolinitas (KPEI)



3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Formación Sejal

Esta Unidad de edad Mioceno medio se caracteriza por presentar niveles de lodolitas grises a la base de la secuencia con laminación plano paralela, ondulosa e inclinada en capas medias a delgadas tabulares asociadas con sistemas lacustres. Un nivel medio asociado a la migración de canales de ríos meandricos muestra secuencias granodecrecientes de arenitas conglomeráticas algo ferruginosas, en capas cuneiformes lenticulares, con estratificación cruzada y laminación inclinada. Un último nivel de limolitas y lodolitas con intensa bioturbación marcan la tendencia de la unidad en ambientes de llanura de inundación de tipo oxidante.

Muestreo XRD

Para la Formación Sejal se analizaron 20 muestras recolectadas en diferentes niveles representativos de lodolitas en diversos puntos dentro del área de estudio.

Tabla 1. Relación de muestras analizadas para la Formación Sejal.

Muestra	Descripción	Formación	Coordenadas	
			N	E
ADA0179C	LODOS CON COSTRA FERRUGINOSA	Fm. Sejal	930,605	949,284
PDH0355A	ARCILLA	Fm. Sejal	923,875	840,427
PDH0355G	ARCILLA	Fm. Sejal	923,875	840,427
CAM0024A	ARCILLAS CARBONOSAS	Fm. Sejal	1,021,069	948,408
CAM0433	ARCILLAS GRISES	Fm. Sejal	1,051,608	983,510
CAM0376	LODO NEGRO	Fm. Sejal	1,043,067	949,734
CAM0352	ARCILLA CAFÉ OSCURA	Fm. Sejal	1,041,451	941,388
ADA0001B	ARCILLA	Fm. Sejal	920,488	1,015,957
CAM0294B	ARCILLA	Fm. Sejal	1,069,163	967,787
CAM0261C	ARCILLA	Fm. Sejal	1,065,297	953,223
EGA0146	ARCILLA	Fm. Sejal	1,025,614	956,834



Muestra	Descripción	Formación	Coordenadas	
			N	E
LES0058A	ARCILLA	Fm. Sejal	933,484	971,040
CAM0562	ARCILLA	Fm. Sejal	1,015,756	946,863
ADA0212B	ARCILLA	Fm. Sejal	924,290	1,020,979
RCP0119	ARCILLA	Fm. Sejal	1,077,940	1,013,380
LES0057A	ARCILLA	Fm. Sejal	933,372	970,167
ADA0088	ARCILLA	Fm. Sejal	933,353	968,121
CAM0294C	ARCILLA	Fm. Sejal	1,069,163	967,787
JMC0073	ARCILLA	Fm. Sejal	1,060,039	995,023
JMC0376A	ARCILLA	Fm. Sejal	1,024,172	958,023

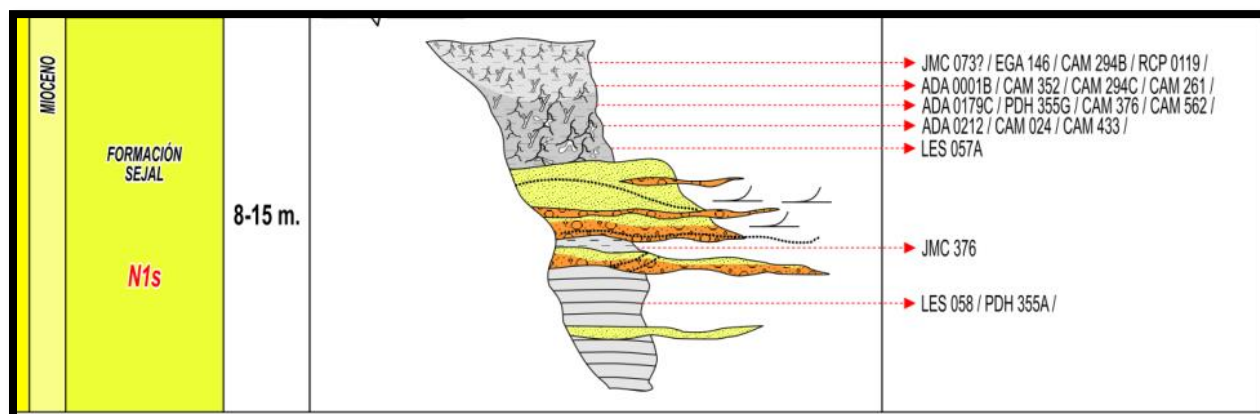


Figura 7. Localización de las muestras en la columna generalizada para la Formación Sejal.

Mineralogía

La mineralogía identificada en la fracción en polvo y la fracción arcilla para las muestras de la Formación Sejal, se encuentra dominada principalmente por cuarzo > 50% y Plagioclasa en algunas muestras de los niveles medio y superior como minerales detríticos dominantes. Dentro de los minerales arcillosos se encuentran Caolinita como mineral dominante seguido de Illita, interestratificados Illita/Esmectita (I/Sm), Clorita, Esmectita y Pirofilita (solo se reporta una muestra). Otros minerales como Anatasa, Siderita, Goethita y Gibbsita también se encuentran en las muestras analizadas.



El análisis comparativo entre la mineralogía presente y los medios de depósito descritos en campo, permite la interpretación detallada de los ambientes dentro de la Formación Sejal, soportados a su vez con los análisis de cristalinidad de Illitas y Caolinitas.

Las medidas de los índices de Kübler para los minerales de Illita permiten obtener información detallada de los procesos diagenéticos a que han estado sometidas las muestras analizadas o los materiales parentales que la conforman en caso de evidenciar una herencia. Los valores obtenidos se encuentran en rangos que varía entre 0.07 y 0.6 $\Delta^{\circ}2\theta$, grados de cristalinidad que se encuentran asociados con la diagénesis profunda hasta la Anquizona tardía; las observaciones de campo permiten determinar que estos valores se encuentran fuera del rango de interpretación diagenética visual para la unidad y por el contrario estaría reflejando el aporte de minerales micáceos provenientes de las rocas Ígneas y Metamórficas del basamento al interior de la cuenca. la variabilidad en los valores estaría sujeta a procesos de meteorización y transporte que alteran las propiedades cristalinas originales mediante un efecto de retrogradación que sería más intenso en unas muestras que en otras.

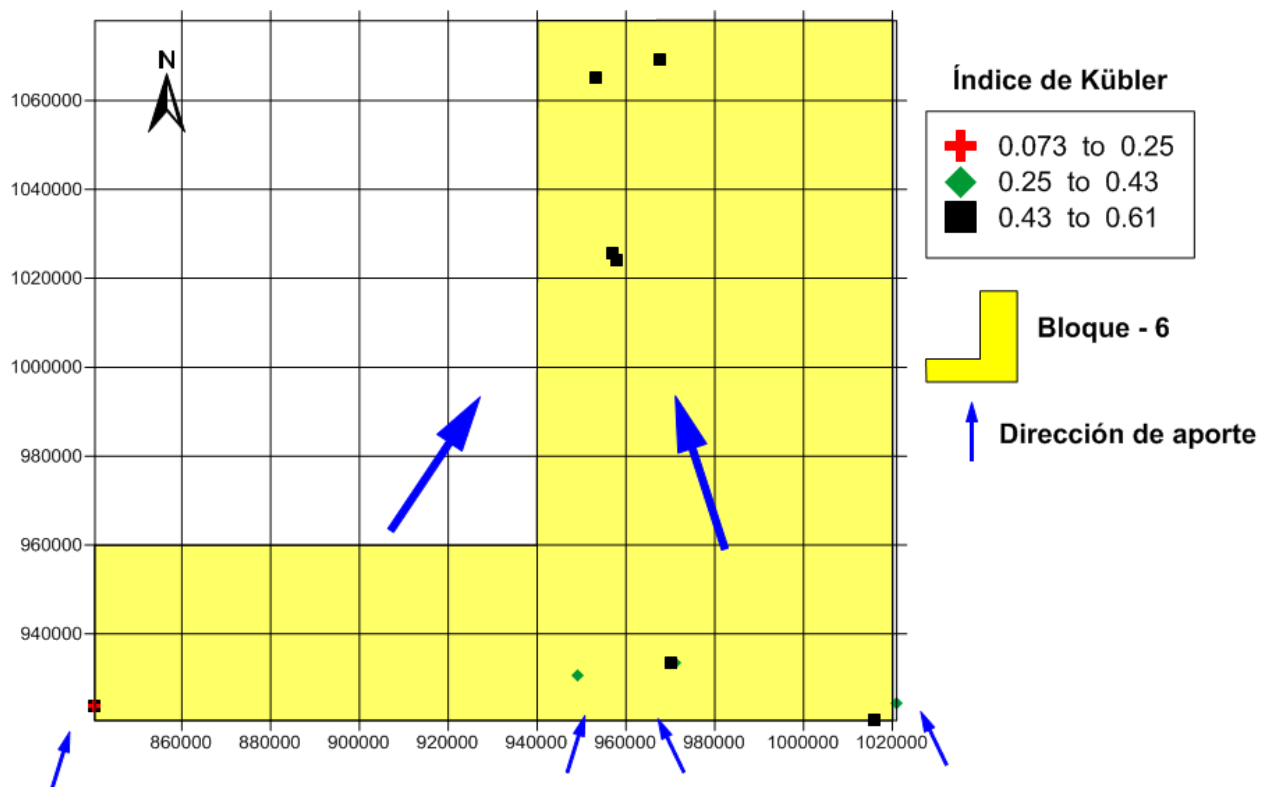


Figura 8. Modelo de fuentes de aporte general a partir de datos de Cristalinidad de Illitas (Índice de Kübler)



La distribución de los valores sugiere unidades de roca de aportes más cristalinos desde el sur aumentando en transporte y meteorización hacia el norte degradando los minerales de Illita en las partes más distales.

La mineralogía presente también indica un componente de aporte de tipo volcánico que se ve reflejado en la muestra CAM-024 en donde con un análisis detallado, se observa la presencia del mineral Erionita, que resulta del grupo de las Zeolitas y es común en suelos donde hay aporte de cenizas volcánicas ricas en vidrio, estos vidrios se ven alterados debido al desarrollo de procesos pedogenéticos de tipo ácido.

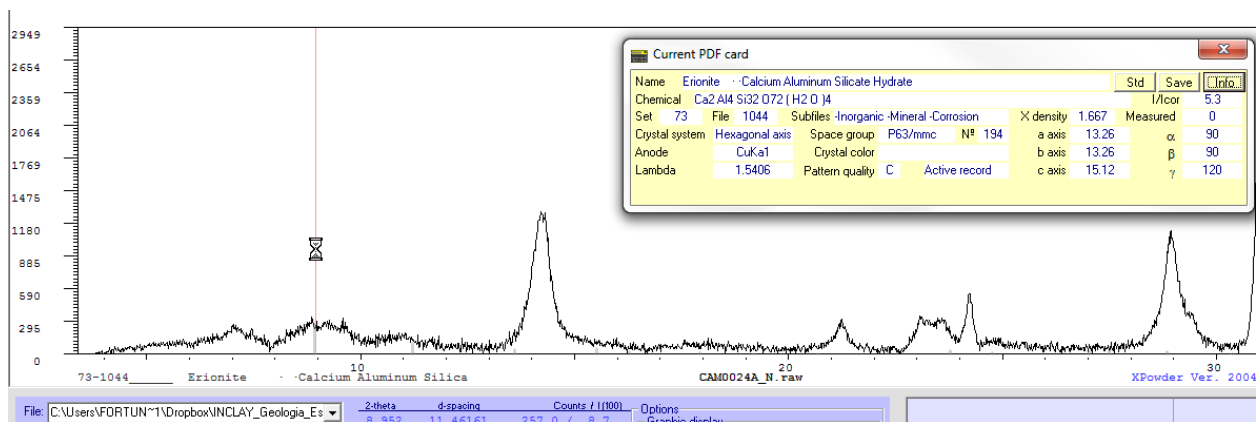


Figura 9. Identificación del mineral Erionita dentro de la muestra CAM-024.

El análisis de la cristalinidad de Caolinitas mediante el índice KPEI (*Kaolinite Paleoenviromental Index*, BONILLA, 2014 en preparación), muestra una distribución homogénea de los valores de cristalinidad de las caolinitas entre moderada a baja cristalinidad que estaría indicando que las caolinitas dentro de la Formación Sejal corresponden a Caolinitas heredadas de unidades arcillosas más antiguas probablemente de tipo marino a transicional que han sido retrabajadas y nuevamente depositadas. Los valores más bajos de cristalinidad que se encuentran entre los 0.51 a 0.68 $\Delta^{\circ}2\theta$ estarían asociados a los efectos de retrabajamiento y degradación de los sedimentos mediante procesos pedogenéticos agresivos de tipo ácido dentro de la unidad, esto asociado a la presencia de minerales como la Gibbsite, Goethita y Siderita que resultan comunes en unidades de suelos de tipo Oxisoles presentes en climas áridos muy similares a los suelos recientes dentro del área de estudio.

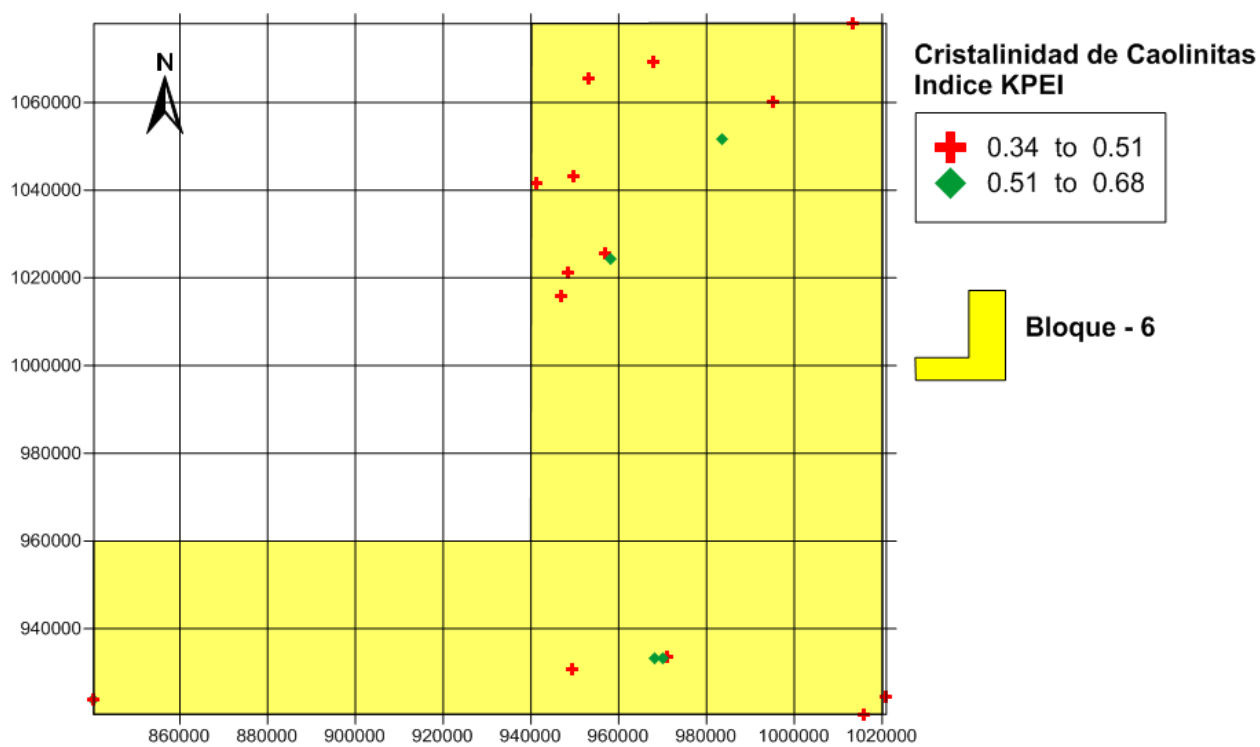


Figura 10. Modelo general de Distribución de cristalinidad de Caolinitas (KPEI) dentro del área de estudio.

El análisis del porcentaje de Illita dentro de los interestratificados Illita/Esmectita (I/Sm), refleja de una manera más precisa las condiciones reales de enterramiento de los sedimentos en condiciones diagenéticas bajas a medias. Los resultados obtenidos de estas medidas ubican los sedimentos de la Formación Sejal en el Rango de Diagénesis somera con intervalos de temperatura en condiciones normales de gradiente (25 -30°C/Km) entre 60 y 100°C y profundidades máximas de 3,5 Km. es de aclarar que debido a las evidencias en el retrabajamiento de los sedimentos dentro de la Formación Sejal, estos valores también podrían estar relacionados con unidades sedimentarias Pre-Sejal y estarían mostrando el reflejo de las condiciones diagenéticas de la Formación Geológica Parental.

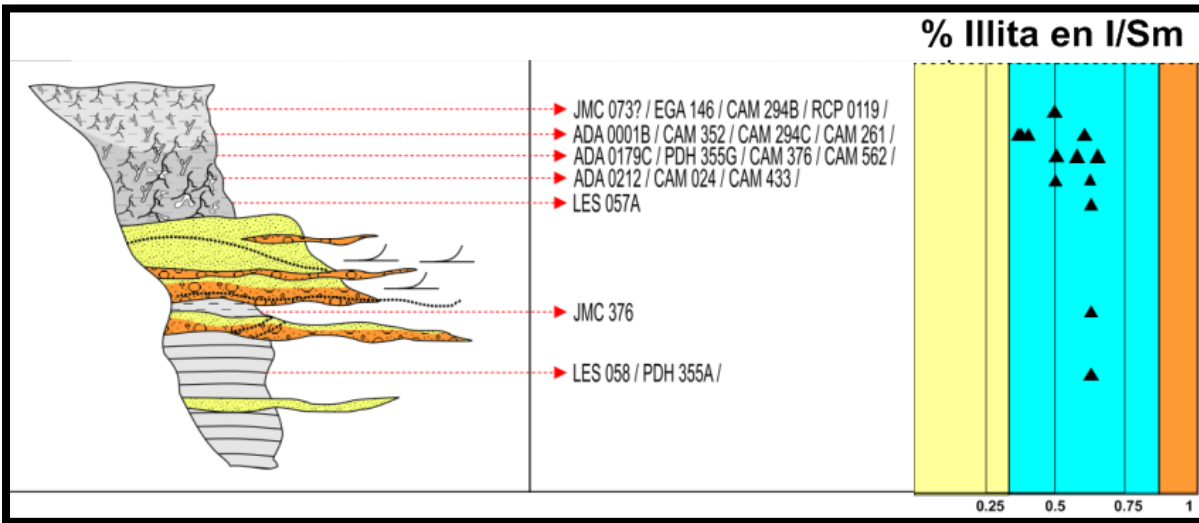


Figura 11. Porcentaje de Illita dentro de los interestratificados Illita/Esmectita (I/Sm).

Formación Matavén

De edad Mioceno Superior, esta unidad suprayace de manera discordante las sedimentitas de la Formación Sejal, se caracteriza por el dominio de arenitas conglomeráticas con matriz lodosa y cemento ferruginoso en algunos niveles con intercalaciones de lodolitas arenosas. Hacia el tope presenta paquetes de lodolitas grises que en conjunto para toda la unidad representan ambientes de ríos meándricos con migración de canales y llanuras de inundación asociadas.

Muestreo XRD

Para la Formación Matavén se analizaron 4 muestras recolectadas en diferentes niveles representativos de lodolitas en diversos puntos dentro del área de estudio.



Tabla 2. Relación de muestras analizadas para la Formación Matavén

Muestra	Descripción	Formación	Coordenadas	
			N	E
RIP0337c	ARCILLA	Fm. Matavén	949,264	899,285
RIP0255E	ARCILLA	Fm. Matavén	947,882	866,063
RIP0337A	ARCILLA	Fm. Matavén	949,264	899,285
RIP0255	ARCILLA	Fm. Matavén	947,882	866,063

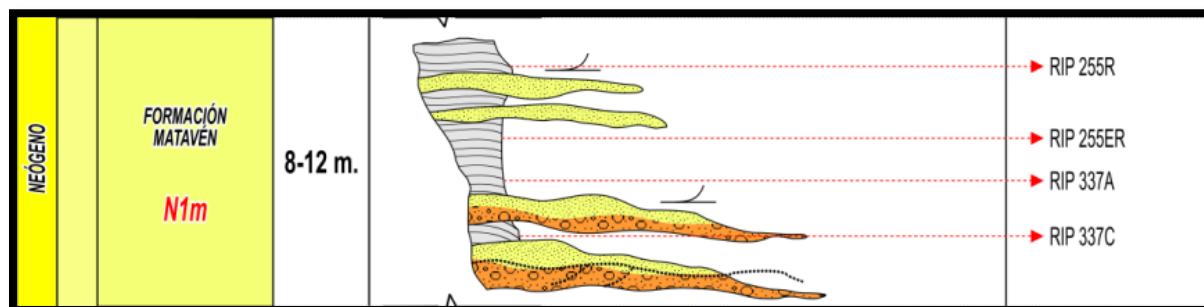


Figura 12. Localización de las muestras en la columna generalizada para la Formación Matavén

Mineralogía

La mineralogía identificada para las muestras de la Formación Matavén muestra el Cuarzo como mineral dominante dentro de los minerales detríticos, solo la muestra RIP255ER muestra un importante contenido de Plagioclasa acompañada de Gibbsita y Goethita ausente en las demás muestras. Este nivel se encontraría asociado mineralógicamente con niveles de paleosuelos con un importante contenido de material detrítico. Los otros niveles analizados mantienen una similitud entre ellos caracterizados por un notable contenido de Caolinita que puede llegar hasta un 55%, mineral de Illita también se presenta en la fracción arcillosa y Cuarzo como único mineral detrítico.

Las medidas de los Índices de Kübler para las Illitas muestran dos condiciones totalmente opuestas, una de estas refleja las condiciones de las fuentes de aporte $IK=0.49 \Delta^{\circ}2\theta$, muy similares a los valores de cristalinidad observados en las muestras de la Formación Sejal; por otra parte un valor de $IK=1.12 \Delta^{\circ}2\theta$



que se correlaciona de manera directa con el porcentaje de Illita en el I/Sm de 50% para la misma muestra (RIP-255R), esta medida se asocia a estados de enterramiento de alrededor de los 2,5Km de profundidad y valores de temperatura cercanos a los 60°C en condiciones normales de gradiente geotérmico (25-30°C/Km). Debido a que esta unidad suprayace la Formación Sejal encontrándose en contacto discordante, podría presentar herencia en este tipo de sedimentos asociado a efectos del retrabajamiento de los sedimentos dentro de la cuenca.

El análisis de cristalinidad de Caolinitas muestra una estabilidad en los sedimentos de la base de la unidad y un notable cambio en el nivel superior en donde se evidencia una Caolinita muy mal cristalizada que podría ser el resultado del desarrollo de suelos con un alto nivel de acidez, favoreciendo la degradación de los filosilicatos.

Terraza (N2t1, N2t2, N2t3 y N2t4)

Así se ha denominado a una sucesión de 4 niveles de terrazas aluviales de edad Plioceno, con espesores que varían de los 3 a 5 metros y corresponden a sucesiones de arenitas líticas y lodolitas grises a marrón relacionadas con las llanuras de inundación y sus respectivos barras de arena de ríos meándricos.

Muestreo XRD

Para la unidad Terraza se analizaron 14 muestras en total que son representativas de los 4 niveles identificados en campo.

Tabla 3. Relación de las muestras analizadas para la unidad Terraza.

Muestra	Descripción	Formación	Coordenadas	
			N	E
LES0054	ARCILLA-LAMINAS CARBONOSAS	N2t4	934,722	963,042
LES0056	ARCILLA	N2t4	935,972	964,162
ADA0145	ARCILLAS GRIS	N2t4	930,044	935,704
ADA0152	ARCILLAS GRIS	N2t4	928,093	933,656



Muestra	Descripción	Formación	Coordenadas	
			N	E
ADA0196	ARCILLAS GRIS	N2t4	928,187	946,567
ADA0101	ARCILLA	N2t3	936,752	971,710
ARF0043C	ARCILLA	N2t2	935,099	921,583
ARF0066C	ARCILLA	N2t4	941,597	928,508
ARF0135	ARCILLA	N2t4	966,138	960,378
ARF0156	ARCILLA	N2t4	972,157	970,956
RIP0386A	ARCILLA	N2t1	947,407	912,764
RIP0386B	ARCILLA	N2t1	947,407	912,764
AMV0185B	ARCILLA	N2t1	938,698	1,005,567
AMV0185A	ARCILLA	N2t1	938,698	1,005,567

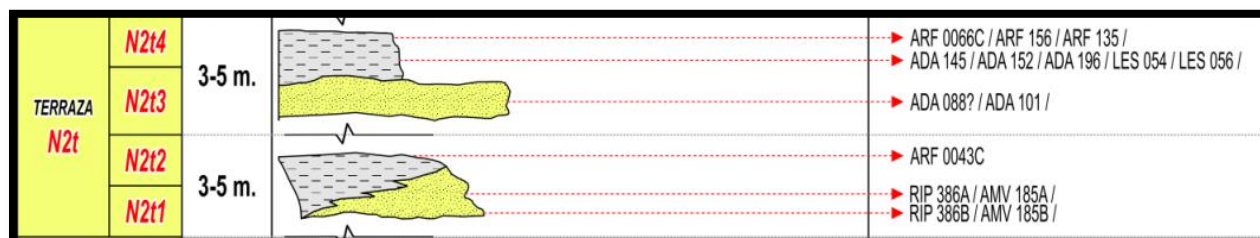


Figura 13. Localización de las muestras para la unidad Terraza dentro de la columna generalizada.

Mineralogía

La mineralogía identificada para los 4 niveles de Terraza muestra un dominio del Cuarzo en todas las muestras, seguidas de Caolinita e Illita como minerales arcillosos principales e interestratificados I/Sm, Esmeclita y Clorita en menor proporción, como minerales accesorios se encuentran Lepidocrocita, Gibbsita, Anatasa y algunos apatitos.

Al igual que en las unidades geológicas infrayacentes, la mineralogía parece constante con un ligero aumento en el contenido de fragmento líticos evidentes en minerales como Anatasas y Apatitos. Minerales de arcilla no cuantificables como Vermiculitas y algunas Cloritas expansivas con evidentes efectos de pilarización por Aluminio en las interlamina sugieren la evidencia de la acidificación de los



medios pedogenéticos que favorecen la precipitación de hidroxidos de aluminio como la Gibbsita, mineral común en suelos y paleosuelos de tipo Oxisoles hacia el tope y una inclinación a Ultisoles a la base de la secuencia (N2t1).

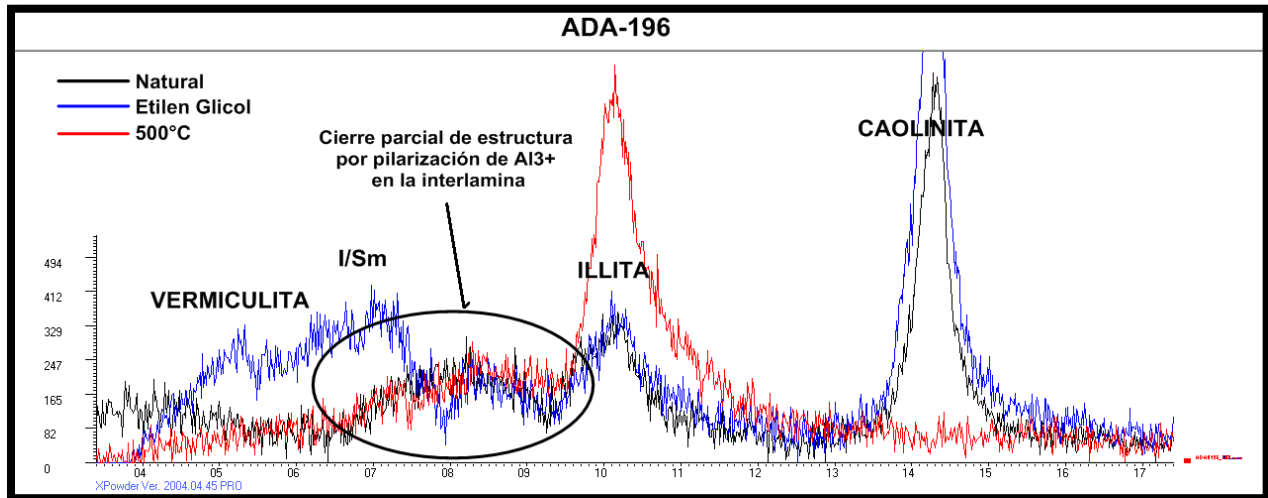


Figura 14. Superposición de tratamientos en laminas orientadas mostrando el efecto de pilarización asociado al Aluminio (Al³⁺) en las interlamina de las Vermiculitas.

La presencia de Lepidocrocita en la muestra AMV-185A estaría relacionada con un posible aumento de la humedad general de la zona junto con un pequeño aumento en la acidez de los suelos. En contraste se encuentra un pequeño nivel inferior en donde la presencia de Siderita sugiere una condición pedogenética neutral (pH = 6.5 - 7), condiciones en donde este mineral se encuentra estable.

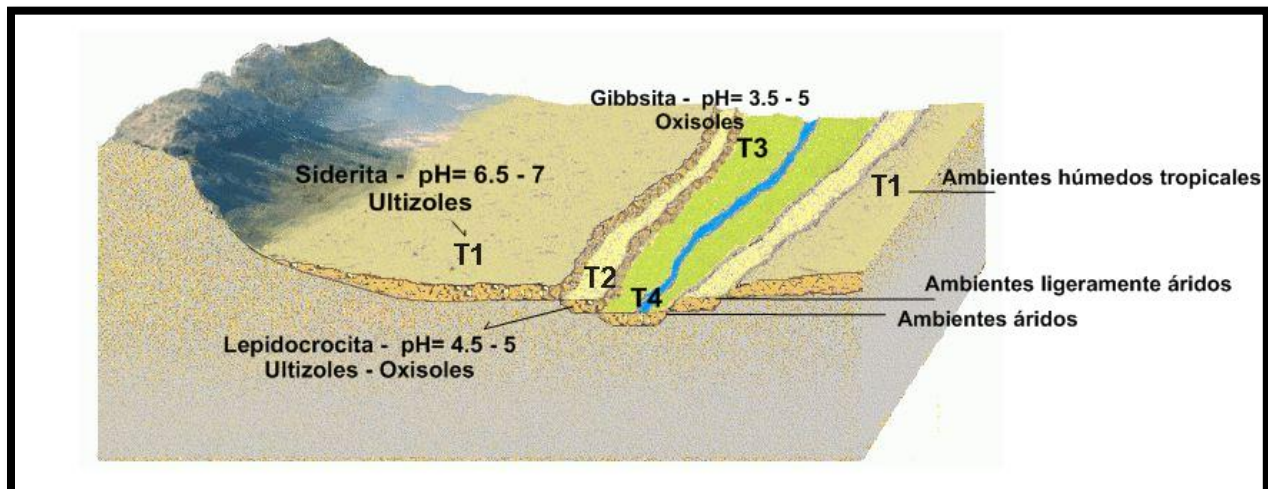




Figura 15. Modelo esquemático interpretativo de la evolución geomorfológica de la unidad terraza y las asociaciones paleoambientales en función de la mineralogía.

La unidad de terrazas del plioceno marca a la base el primer evento de humidificación de la cuenca en donde el aumento en el contenido de la materia orgánica, la presencia de Siderita y Lepidocrocita se relacionan con el desarrollo de suelos de tipo Ultisol, asociados con ambientes de abundante vegetación en condiciones húmedas tropicales. Posteriormente se observa la tendencia a la aridificación de la cuenca con ocasionales apariciones de Gibbsita que evidencian un aumento en la acidez de los suelos.

El análisis de la cristalinidad de las Caolinitas muestra una distribución bimodal entre baja y muy baja cristalinidad, esto debido al aporte de los sedimentos retrabajados de unidades infrayacentes.

Las respuestas cristalinas de las Illitas y de los contenidos de Illita en los interestratificados I/Sm se mantienen similares a los valores encontrados en unidades infrayacentes, soportando la hipótesis del retrabajamiento y la estabilidad en las áreas fuente de los sedimentos.

Aluvial (N2a)

Esta unidad se caracteriza por la presencia de lodolitas, limolitas y litoarenitas grisáceas con sigmoides de progradación lateral a la base, seguidas de capas lenticulares de litoarenitas lodosas suprayacidas por niveles de lodolitas bioturbadas de color gris y rojizo.

Muestreo XRD

Esta unidad cuenta con solo dos muestras representativas para XRD de la base y el techo.

Tabla 4. Relación de muestras analizadas para la unidad de Aluvial.

Muestra	Descripción	Formación	Coordenadas	
			N	E
LES0152A	ARCILLA	N2a inf	938,454	1,039,342
ADA0214	ARCILLAS GRISES	N2a sup	930,999	1,026,970

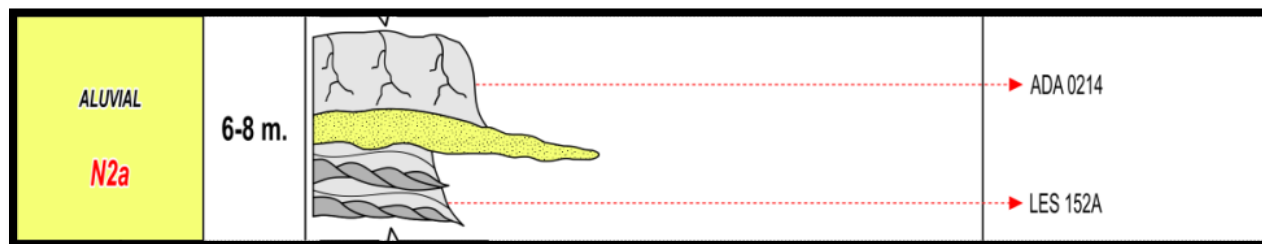


Figura 16. Localización de las muestras en la columna generalizada.

Mineralogía

La mineralogía característica de las muestras analizadas corresponde a Cuarzo como mineral dominante, Plagioclasa solo a la base de la unidad. Como minerales arcillosos se encuentran Caolinita como mineral dominante, seguida de Illita y Esmectita al tope de la unidad.

La aparición de Esmectita en el nivel superior de la unidad puede estar asociado a un efecto climático de aridificación y baja en la precipitación, aumentando el contenido de bases disponibles en los suelos que favorecen la presencia de esmectitas, la ausencia de Gibbsita y otros productos hidrolizados también soporta esta hipótesis; sin embargo este podría corresponder de igual manera a un efecto local ya que no se cuenta con un mayor número de muestras que sean correlacionables en este y otros aspectos.

El análisis de cristalinidad de caolinitas muestra una mejor cristalinidad en las caolinitas del nivel superior, este efecto estaría relacionado con el aumento de bases disponibles en los suelos, incrementando el pH incluso por encima de 7,5, evitando la degradación de los filosilicatos cuando son sometidos a condiciones ácidas.

Las condiciones diagenéticas reflejadas en la unidad corresponden al igual que en las unidades infrayacentes a condiciones heredadas tanto para las medidas del Índice de Kübler en Illitas que ubican los grados de cristalinidad en condiciones de alta diagénesis y transición al metamorfismo de bajo grado (0.47 y 0.37 $\Delta^{\circ}2\theta$). De lo anterior se puede deducir que existe tanto el retrabajamiento de los sedimentos como el aporte constante de las mismas unidades a lo largo de la secuencia estudiada.



Los porcentajes de Illita en los interestratificados I/Sm solo se ven reflejados en la muestra de la base de la unidad y asocian condiciones diagenéticas cerca de los 2,5 Km de profundidad (Illita = 50% en I/Sm), resultando equivalentes a los valores encontrados en las formaciones infrayacentes.

Depósitos Aluviales recientes (Qal)

Esta unidad representa las condiciones ambientales y de sedimentación actuales para el área de estudio y corresponden a depósitos entre 3 y 8 metros de espesor de barras de arenas finas, líticas y arenas cuarzosas lodosas de color café seguidas de niveles de depósitos de arcillas bioturbadas, correspondiendo a ambientes de ríos meándricos que presentan una clara migración de canales con sus respectivas llanuras de inundación asociadas.

Muestreo XRD

Se analizaron tres muestras por XRD de este tipo de depósitos ubicadas a la base y al techo.

Tabla 5. Relación de las muestras analizadas para los depósitos aluviales recientes

Muestra	Descripción	Formación	Coordenadas	
			N	E
EMB0205	ARCILLA	Depósito aluvial reciente	1,078,443	955,878
JMC0022A	ARCILLA	Depósito aluvial reciente	1,071,313	977,558
AMV0064	ARCILLA	Depósito aluvial reciente	995,643	1,024,829

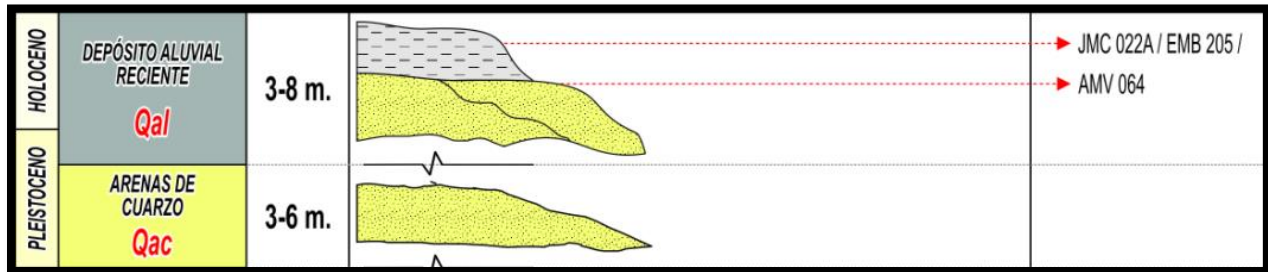


Figura 17. Localización de las muestras para los Depósitos Aluviales recientes dentro de la columna generalizada.

Mineralogía

La mineralogía característica de estos depósitos corresponde principalmente a Cuarzo y Plagioclasa en baja proporción (<10%) como materiales detríticos. La muestra AMV-064 localizada a la base, carece de Plagioclasa y presenta un mayor contenido de Cuarzo. Los minerales arcillosos presentes son Caolinita para la totalidad de las muestras e Illita solo para la muestra de la base; otros minerales como la Gibbsita se encuentran solo en las muestras más superficiales.

Al Igual que en las Formaciones geológicas infrayacentes, la presencia de Gibbsita se muestra como un marcador ambiental de condiciones de alta acidez en el desarrollo de suelos de tipo Oxisol que favorecen la precipitación de productos hidrolizados de aluminio.

El análisis de la cristalinidad de caolinitas muestra una ligera disminución en la cristalinidad de la caolinita hacia el tope de estos depósitos, lo que podría estar marcando un aumento en la acidez favoreciendo la degradación de este tipo de filosilicatos justificados por la aparición de Gibbsita.

Los resultados en la cristalinidad de Illitas (Índice de Kübler), solo se evidencia a la base de estos depósitos, esto estaría reflejando condiciones que estarían asociadas al último evento del pleistoceno registrado en los niveles de arenas cuarzosas de color gris claro que se encuentran distribuidas en extensas sabanas con poco a nulo aporte de sedimentos arcillosos.



Los contenidos de Illita dentro de los interestratificados manifiestan para los sedimentos más recientes un predominio de cerca del 90% de Esmectita en los I/Sm mostrando un nulo efecto diagenético en estos sedimentos.

Análisis general de la sección estudiada

Enterramiento

Para determinar las condiciones de enterramiento se tuvo en cuenta el índice de Reichweite que tiene en cuenta la posición de la segunda reflexión de la fracción esmectítica dentro del interestratificado I/Sm (001/002) en saturación con Etilen Glicol para determinar el porcentaje de mineral de Illita dentro del I/Sm el cual está relacionado directamente con la profundidad alcanzada por efectos diagenéticos (Moore & Reynolds, 1997).

Las respuestas encontradas para las medidas de Reichweite en la sección estudiada, ubican la máxima profundidad alcanzada entre los 3.5 a 4 Km dentro de los modelos estándar de enterramiento con condiciones de gradiente de 25 a 30°C/Km. Las unidades que reflejan estas condiciones son la Formación Sejal y la Formación Matavén. Según las observaciones de campo y la edad de las Formaciones Sejal y Terraza; queda una inquietud respecto a las condiciones de enterramiento máximas alcanzadas ya que en otras medidas como el índice de Kübler y las cristalinidades de caolinitas, pareciera que hubiera un reciclaje de los sedimentos, abriendo la ventana a la posibilidad de una diagénesis heredada de unidades litológicas de edad pre-Sejal. Por otro lado, estos valores asociados con el enterramiento, se ven reflejados de una manera más confiable a condiciones de cerca de los 2 Km de profundidad asociados con efectos diagenéticos someros, allí se encuentran muestras de la Formación Sejal, Formación Matavén y Terraza. Es de resaltar que solo una muestra de la Formación Matavén presenta concordancia con la medida de cristalinidad de Illita (Índice de Kübler) en el mismo rango de profundidad y aunque no es concluyente se puede inferir que esta podría ser la profundidad real alcanzada por lo menos para la Formación Matavén y Sejal (Figura 18).

Proveniencia

Para determinar las fuentes de aporte dentro de la sección estudiada, se tuvo en cuenta las medidas de cristalinidad de Illitas (Índice de Kübler) y a su vez la mineralogía presente en cada una de las muestras. Los resultados de la cristalinidad de las Illitas reflejan las condiciones diagenéticas a que han estado sometidas y para el caso de la sección estudiada, estos valores son el reflejo de condiciones diagenéticas profundas o incluso de transiciones al metamorfismo de bajo grado. De lo anterior se puede concluir que las Illitas existentes en las muestras analizadas corresponden a minerales heredados de las unidades del basamento expuesto, igualmente existe una evidencia de aporte ígneo-volcánico y bajo transporte



en la presencia de plagioclasas identificadas en la mayoría de las muestras. De los valores de cristalinidad y las fuentes de aporte se puede concluir que las fuentes de aporte han permanecido constantes a lo largo de la historia geológica de la sección estudiada y que existe una evidencia del reciclaje de los sedimentos reflejados en la herencia de los minerales de la Formación infrayacente expuesta como es el caso de la evolución geomorfológica de los sistemas de terrazas del Plioceno Inferior (Figura 18).

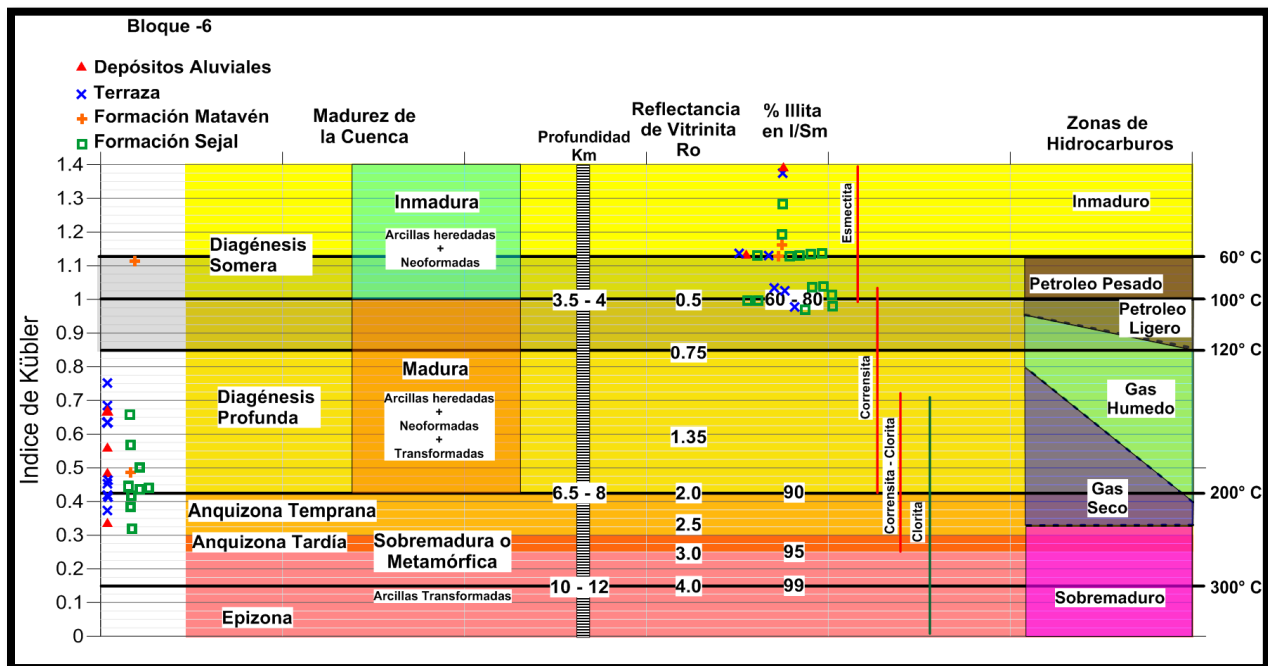


Figura 18. Distribución de las medidas de cristalinidad y % de Illita relacionadas con las condiciones de enterramiento de los minerales arcillosos.

Paleoambientes

El análisis de la mineralogía existente y las medidas de cristalinidad de Caolinitas (KPEI), permitieron definir el comportamiento en los ambientes a lo largo de la sección estudiada. Se encontraron relaciones directas entre la presencia de minerales característicos en el desarrollo pedogenético de suelos del tipo Oxisoles y Ultisoles. Las observaciones de campo identifican la presencia de paleosuelos en cada una de las unidades de la sección estudiada, estos niveles que fueron muestreados y analizados por XRD presentaron la siguiente relación.



Los Oxisoles en su mayoría se caracterizan por ser suelos ácidos con importantes contenidos de hidroxidos metálicos como la Goethita y la Gibbsita, estos minerales generalmente se asocian a rangos de pH que oscilan entre 3.5 a 5, ligado a esto, las medidas de Caolinitas reflejan un deterioro notable en los valores de cristalinidad donde existe la presencia de Gibbsita, de esta manera el Aluminio disponible para la precipitación de Gibbsita estaría siendo proporcionado por los minerales arcillosos en especial por las caolinitas. Otro efecto del exceso de Aluminio disponible en el medio se observa en el análisis detallado de los espectros de XRD, donde el efecto de pilarización de minerales como vermiculitas y Esmectitas presentan un cierre parcial de la estructura al ser sometidos al tratamiento de calcinación a 500°C (Figura 14). En contraste, se encuentran unos niveles donde aparece Lepidocrocita y Siderita, la presencia de estos minerales se asocia a condiciones de mayor humedad y el pH oscila en torno a la neutralidad (5.5 - 7), a su vez la cristalinidad de las caolinitas aunque sigue siendo baja, es mucho mejor que la medida en los niveles que presentan Gibbsita; estas condiciones de mayor humedad y la mineralogía existente indican un desarrollo de suelos de tipo Ultisoles y a su vez un reflejo de un cambio climático a condiciones menos áridas que en el resto de la sección. Estos niveles de mayor humedad se observan en los niveles de Terraza de edad Plioceno y se infieren en los niveles base de los depósitos aluviales recientes.

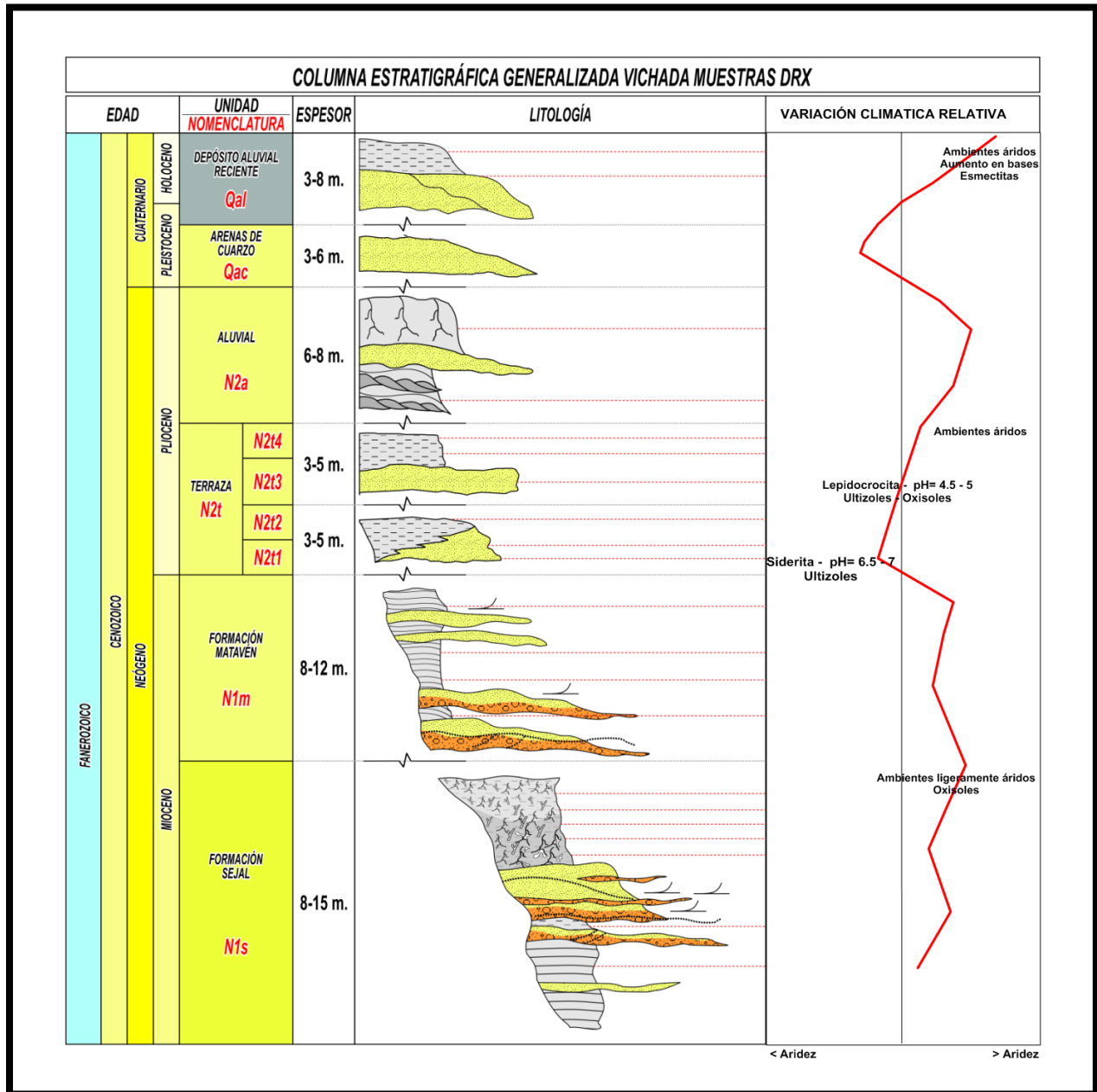


Figura 19. Variación Climática relativa en función de la mineralogía asociada a los paleosuelos presentes en cada una de las unidades analizadas.



REFERENCIAS

BESOAIN, E. *Mineralogía de arcillas en suelos*. San José de Costa Rica., 1985.

BONILLA, G. *Caracterización Mineralógica y Paleo-ambiental de las Arcillolitas de la Formación Guaduas*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, 87 p. Bogotá. 2008.

BONILLA, G., SARMIENTO, G., GAVIRIA, S. *Proveniencia y transformación diagenética de minerales arcillosos Del Maastrichtiano - Paleoceno al norte de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia*. Geología Colombiana, Edición Especial, 36 No. 1, pp 179-196. 2011.

CHUNG, F. H. *Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns. I. Matrix flushing method of quantitative multicomponent analysis*. Journal of Applied Crystallography, v.7, 519-525. 1974.

MEUNIER, A. *Clays*. Springer Berlin Heidelberg New York. 2005.

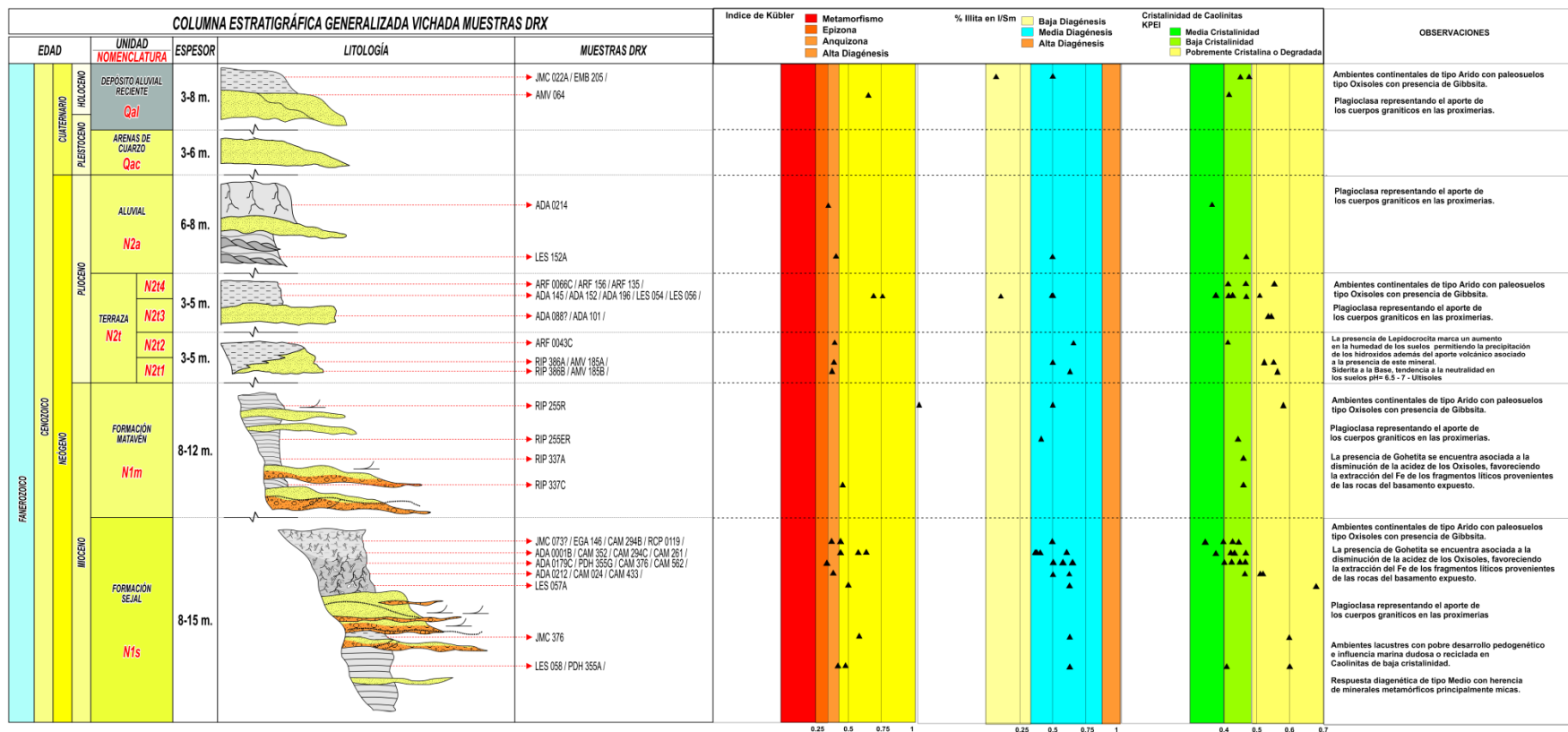
MOORE, D. AND REINOLDS, R. *X ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals.*, 2nd ed. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1997

WARR L., RICE A. *Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data*. J. metamorphic Geol., 12,141 – 152. 1994.

WILL, G. *Powder Diffraction, The Rietveld Method and the Two Stage Method to Determine and Refine Crystal Structures from Powder Diffraction Data*. Springer Berlín Heidelberg New York. 2006.



ANEXOS





Muestra	Descripción	Formación	N	E	% I/Sm	Kübler Index	KPEI	DESCRIPCIÓN	Siderite	Quartz	Pyrite	Anatase	Apatite	Gypsum	Goethite	Lepidocrocite	Gibbsite	K-Feldspar	Plagioclase	Pyrophyllite	Illite Mica	I / Sm	Montmorillonite	Clorita	Kaolinite
1	LES0152A	ARCILLA	N2a inf	938,454	1,039,342	50	0.40	0.47		0.8	62.0		1.0					0.7	4.4		15.2		1.8	14.1	
2	LES0054	ARCILLA-LAMINAS CARBONOSAS	N2t4	934,722	963,042	NA	NA	0.43	Vermiculitas Aluminosas		38.3		4.2				19.1				5.0		7.4	1.0	25.0
3	LES0056	ARCILLA	N2t4	935,972	964,162	50	NA	0.51	Clorita	0.1	83.3							0.8	0.2		8.2	6.2	0.5	0.2	0.6
4	ADA0145	ARCILLAS GRIS	N2t4	930,044	935,704	NA	NA	0.47	Clorita expansiva + Ver+Al (pilarización)		58.4		1.2					0.4			1.9	19.0	7.1	0.7	11.2
5	ADA0152	ARCILLAS GRIS	N2t4	928,093	933,656	50	0.64	0.41	Abundante Sm/Clorita?		48.0			0.9				0.4			11.8	26.0	2.8	0.7	9.5
6	ADA0196	ARCILLAS GRIS	N2t4	928,187	946,567	15	0.75	0.37	desarrollo pedogenético		50.8		0.8					0.3			11.4	25.2		0.3	11.2
7	ADA0179C	LODOS CON COSTRA FERRUGINOSA	Fm. Sejal	930,605	949,284	50	0.33	0.44	herencia de minerales micaceos	0.8	64.0		0.9		1.8			0.5			13.9	10.4		0.3	7.5
8	ADA0214	ARCILLAS GRISES	N2a sup	930,999	1,026,970	NA	0.39	0.37	Sm con doble cierre 14 y 12	1.0	66.8		1.0					1.0			10.3		6.6	0.5	12.8
9	ADA0101	ARCILLA	N2t3	936,752	971,710	NA	NA	0.55	CJ/V?		88.1		1.3					0.5				1.4		0.6	8.1
10	PDH0355A	ARCILLA	Fm. Sejal	923,875	840,427	60	0.43	0.60			78.6				4.2						7.7			0.6	8.8
11	PDH0355G	ARCILLA	Fm. Sejal	923,875	840,427	70	0.07	0.46		3.9	66.8		1.0		1.5						8.7	8.0		0.7	9.5
12	CAM0024A	ARCILLAS CARBONOSAS	Fm. Sejal	1,021,069	948,408	NA	NA	0.51	Erionita? Amb. Sed lacustres-producto de alteración de cenizas vitreas		39.3		1.7				9.2	0.5			3.9	18.2		0.9	26.4
13	CAM0433	ARCILLAS GRISES	Fm. Sejal	1,051,608	983,510	60	NA	0.52			51.4		1.9				20.9	0.8			6.7			1.1	17.2
14	CAM0376	LODO NEGRO	Fm. Sejal	1,043,067	949,734	60	NA	0.40	14.5-15-12.5		48.5		2.3				4.5	1.0			6.3	10.4	3.1	1.1	22.8
15	CAM0352	ARCILLA CAFÉ OSCURA	Fm. Sejal	1,041,451	941,388	60	NA	0.38	Sm+Al		45.5		1.8				20.4	0.5			5.9	9.8	3.2	0.6	12.3
16	ARF0043C	ARCILLA	N2t2	935,099	921,583	70	0.44	0.42			18.0		2.0					0.2			3.8	22.3			53.7
17	ARF0066C	ARCILLA	N2t4	941,597	928,508	NA	NA	0.54	Ver+Al cierre a 12		62.2		2.0		0.4			8.3	0.7		13.0			1.0	12.4



	Muestra	Descripción	Formación	N	E	% I/Sm	Kübler Index	KPEI	DESCRIPCIÓN	Siderite	Quartz	Pyrite	Anatase	Apatite	Gypsum	Goethite	Lepidocrocite	Gibbsite	K-Feldspar	Plagioclase	Pyrophyllite	Illite Mica	I / Sm	Montmorillonite	Chlorita	Kaolinite
18	ARF0135	ARCILLA	N2t4	966,138	960,378	NA	NA	0.42	Ver+Al cierre a 12 y a 10		46.5	1.6	4.5						1.2			3.3		2.6	40.5	
19	ARF0156	ARCILLA	N2t4	972,157	970,956	NA	NA	0.48	Vermiculitas Aluminosas		61.7		2.9					1.3	0.8			4.0		1.6	27.6	
20	ADA0001B	ARCILLA	Fm. Sejal	920,488	1,015,957	30	0.49	0.43			82.2								0.6			7.0			10.2	
21	EMB0205	ARCILLA	Depósito aluvial reciente	1,078,443	955,878	10	NA	0.48			68.7							3.4	1.2	5.8					21.0	
22	RIP0337c	ARCILLA	Fm. Mataven	949,264	899,285	NA	0.49	0.47			58.1								0.5			10.1			31.3	
23	CAM0294B	ARCILLA	Fm. Sejal	1,069,163	967,787	50	0.42	0.44			49.2								0.2			10.6			39.9	
24	RIP0386A	ARCILLA	N2t1	947,407	912,764	NA	NA	0.53	Erionita + mordenita?		100.0								0.2							
25	RIP0386B	ARCILLA	N2t1	947,407	912,764	NA	NA	NA	Erionita + mordenita?		91.5					8.8			0.2							
26	CAM0261C	ARCILLA	Fm. Sejal	1,065,297	953,223	35	0.61	0.48			68.0								0.2			5.0			27.3	
27	EGA0146	ARCILLA	Fm. Sejal	1,025,614	956,834	NA	0.48	0.34	Presencia de Pirofilita	2.2	15.7		0.2	2.2					0.2		5.2	10.7			63.4	
28	LES0058A	ARCILLA	Fm. Sejal	933,484	971,040	NA	0.41	0.42		2.6	54.2		0.8						0.3			23.9			18.3	
29	JMC0022A	ARCILLA	Depósito aluvial reciente	1,071,313	977,558	50	NA	0.44			51.1							6.3	0.5	10.7				0.4	31.1	
30	AMV0185B	ARCILLA	N2t1	938,698	1,005,567	60	0.39	0.56		2.8	40.4		1.3	2.3								35.8		0.2	17.2	
31	RIP0255E	ARCILLA	Fm. Mataven	947,882	866,063	40	NA	0.43			48.4					14.9		12.8	0.2	21.6					2.5	
32	RIP0337A	ARCILLA	Fm. Mataven	949,264	899,285	NA	NA	0.44			60.9								0.2			3.5			35.9	
33	CAM0562	ARCILLA	Fm. Sejal	1,015,756	946,863	NA	NA	0.41			83.2											0.4			16.4	
34	ADA0212B	ARCILLA	Fm. Sejal	924,290	1,020,979	50	0.34	0.47	Bohemita? Natrolita?		54.1			2.3					0.1			17.5	4.5		21.5	
35	RCP0119	ARCILLA	Fm. Sejal	1,077,940	1,013,380	NA	NA	0.40	Erionita - Herencia		78.8								0.3						20.9	
36	LES0057A	ARCILLA	Fm. Sejal	933,372	970,167	60	0.50	0.68		2.3	79.7		0.9					3.9	0.2	6.7		6.1			0.7	
37	ADA0088	ARCILLA	Fm. Sejal	933,353	968,121	NA	NA	0.55			53.8			2.3				9.1	0.7	15.5				0.7	17.9	
38	RIP0255	ARCILLA	Fm. Mataven	947,882	866,063	50	1.12	0.57			35.6			2.5					0.3			6.0			55.6	



	Muestra	Descripción	Formación	N	E	% I/Sm	Kübler Index	KPEI	DESCRIPCIÓN	Siderite	Quartz	Pyrite	Anatase	Apatite	Gypsum	Goethite	Lepidocrocite	Gibbsite	K-Feldspar	Plagioclase	Pyrophyllite	Illite Mica	I / Sm	Montmorillonite	Chlorite	Kaolinite
39	CAM0294C	ARCILLA	Fm. Sejal	1,069,163	967,787	40	0.58	0.43			43.0								0.2			10.2				46.6
40	JMC0073	ARCILLA	Fm. Sejal	1,060,039	995,023	NA	NA	0.44			63.1						2.1	0.8	3.7						0.5	29.8
41	JMC0376A	ARCILLA	Fm. Sejal	1,024,172	958,023	60	0.57	0.61			51.2								0.8			9.9				38.1
42	AMV0064	ARCILLA	Depósito aluvial reciente	995,643	1,024,829	NA	0.69	0.42			75.8								0.2			11.5			0.4	12.1
43	AMV0185A	ARCILLA	N2t1	938,698	1,005,567	50	0.44	0.58	Lepidocrocita		49.2			2.7			2.0		0.2			19.4			0.7	26.2