

DETERMINACION DE OXIGENO EN CARBONES EMPLEANDO ANALISIS POR ACTIVACION CON NEUTRONES DE 14 MeV

Aurelio Arbildo, Ricardo Espinosa, Carmen Poma,
José Eyzaguirre y Herminio Hinostroza
Instituto Peruano de Energía Nuclear, Apt. 1687, Lima - Perú

Recibido 2 Junio de 1988

Resumen

Se ha desarrollado una metodología para la determinación no destructiva de oxígeno en carbones. El método se basa en la reacción nuclear $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ con neutrones de 14 MeV producidos en un generador de neutrones AID-J25

El análisis ha sido posible gracias al desarrollo de una interface para controlar desde una microcomputadora todo el proceso de irradiación y medidas posteriores de la actividad del ^{16}N producido. El método ha sido automatizado adicionalmente mediante el desarrollo de software para el tratamiento de los espectros registrados en un analizador multiescalímetro.

Se describen los programas de computadora utilizados y se muestran resultados para muestras de carbón de diferente procedencia.

Del análisis de oxígeno en carbón y cenizas se estima el contenido de carbono orgánico en las muestras y se sugiere una correlación entre dicho contenido y la materia volátil.

Los tiempos de irradiación, decaimiento y contaje totalizan 45 segundos brindando un análisis rápido y obteniéndose precisiones entre el 1 y 3 o/o.

1. INTRODUCCION

El interés en el carbón se ha incrementado ostensiblemente en los últimos años, debido fundamentalmente al control en la producción de petróleo y al lento desarrollo de las energías no convencionales. Uno de los componentes mayores del carbón es el oxígeno.

El oxígeno en los carbones se encuentra en forma orgánica e inorgánica; el conocimiento del contenido del oxígeno orgánico es importante para el balance de masa en los procesos de combustión y conversión (gasificación y licuefacción). El contenido de oxígeno inorgánico está asociado al contenido mineral de los carbones, principalmente óxidos de silicio, aluminio, y hierro. El contenido de oxígeno orgánico puede calcularse a partir del conocimiento del oxígeno total y del contenido de cenizas y su concentración de oxígeno.

El análisis de oxígeno por métodos convencionales presenta ciertas dificultades por lo que con mucha frecuencia se supone que el oxígeno completa el 100 o/o luego de haberse determinado los componentes mayores de la muestra. Sin embargo, el oxígeno puede cuantificarse adecuadamente utilizando técnicas nucleares debido, principalmente, al considerable desarrollo que han evidenciado las técnicas instrumentales.

El análisis de oxígeno mediante activación neutrónica se basa en la reacción nuclear $^{16}\text{O} (n,p)^{16}\text{N}$ inducida por neutrones de alta energía. En esta reacción la cantidad de ^{16}N producida está relacionada directamente con el contenido de oxígeno en la muestra.

Numerosos autores han reportado el análisis de oxígeno en matrices tan diversas como rocas, material lunar, meteoritos, carbones, óxidos de uranio, aceros, metales y aleaciones (1-7). Sin embargo, el corto período de semidesintegración del ^{16}N producido, así como la necesidad de efectuar correcciones confiables por las variaciones del flujo neutrónico durante las irradiaciones, hacen que la implementación del método presente serios inconvenientes técnicos a los laboratorios de recursos limitados.

Morgan y Ehmman (8) han desarrollado un método que permite simplificar notablemente el análisis al utilizar un analizador multicanal, (en modo intervalos de tiempo secuenciales), para registrar la evolución en el tiempo de la irradiación con neutrones y la historia del decaimiento radiactivo del ^{16}N obtenido en la irradiación.

En 1983, James y Akanni (9) han diseñado un sistema automático, controlado por computadora, para el análisis rutinario de oxígeno y en 1987, la compañía Shell ha instalado un sistema neumático de transferencia para la determinación de oxígeno en hidrocarburos (10). El presente trabajo constituye una adaptación del método de Morgan y Ehmman utilizando el generador de neutrones AID-J25, instrumentación nuclear disponible en IPEN así como el "software" y una interface de desarrollo propio.

2. FUNDAMENTO DEL METODO

De los tres isótopos del oxígeno existentes en la naturaleza el más abundante, 99.756 o/o, es el de masa atómica 16 que por acción de los neutrones de 14 MeV sufre una reacción nuclear (n,p) que conduce al radionúclido ^{16}N , el que tiene un período de semidesintegración de 7.13 seg.

La sección eficaz para esta reacción es 39 mb(11). El decaimiento del ^{16}N lleva a la emisión de dos rayos gamma predominantes de 6128 y 7117 keV con intensidades absolutas de 69 o/o y 5 o/o respectivamente. Esta combinación de parámetros es muy favorable pues el período corto permite un análisis extremadamente rápido y sensible, mientras que la alta energía de los rayos gamma emitidos posibilita un análisis casi libre de in-

terferencias y con correcciones mínimas por efectos de autoabsorción de la radiación gamma en matrices de diferentes densidades.

Los únicos elementos que pueden interferir son flúor, a través de la reacción $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ y boro que produce un radionúclido que emite similares energías mediante la reacción $^{11}\text{B}(n,p)^{11}\text{Be}$. Estas interferencias son raramente encontradas en carbones y devienen importantes para relaciones fluor/oxígeno y boro/oxígeno mayores que 0.02, y 100 respectivamente (12)

La actividad, átomos de ^{16}N que se desintegran en la unidad de tiempo, inducida por los neutrones en la muestra viene dada por

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\lambda A(t) + \sigma_a N_p \lambda \phi(t) \quad (1)$$

donde $A(t)$ = actividad de ^{16}N al tiempo t (bq)
 λ = constante de decaimiento del ^{16}N (S^{-1})
 σ_a = sección eficaz de reacción (cm^2)
 N_p = átomos de oxígeno presente en la muestra
 $\phi(t)$ = flujo de neutrones de irradiación ($\text{cm}^{-2} \text{S}^{-1}$)

La actividad producida es proporcional al contenido de oxígeno en la muestra y a una función del tiempo que puede ser calculada en base a la "historia de irradiación" $\phi(t)$.

3. PARTE EXPERIMENTAL

Las muestras a irradiar son molidas y envasadas en envases cilíndricos de polietileno de 4 cm de altura y 1.1 cm de diámetro con una capacidad de 3.1 cm^3

Aproximadamente 3 g de la muestra de carbón pulverizada en un mortero de ágata fueron envasados en las cápsulas y la masa determinada por diferencia. Las cenizas se obtuvieron por quemado de carbón a 900°C hasta peso constante.

Los envases son enviados neumáticamente para su irradiación en el generador de neutrones; durante la irradiación, el flujo neutrónico es monitoreado por un detector de neutrones cuya información es registrada en un analizador multicanal.

Terminada la irradiación, las muestras son enviadas para medir los fotones que emite el ^{16}N mediante dos detectores de INa (TI). La información enviada por estos detectores es registrada, en la misma escala de tiempo, por el analizador multicanal. El espectro registrado en el analizador es transferido al microcomputador para el tratamiento de los datos.

GENERADOR DE NEUTRONES DE 14MeV

Es el modelo J-25 fabricado por la firma A.I.D. (Grenoble-Francia). Produce neutrones de 14 MeV acelerando deuterones hasta una energía de 150 KeV, e impactándolos en un blanco de titanio tritiado de 30 cm^2 de área activa y 4 Ci de actividad sobre soporte de cobre. La corriente máxima alcanzada en este trabajo fue 0.5 mA correspondiendo a un rendimiento neutrónico de aproximadamente 10^{10} n.s^{-1} .

SISTEMA DE TRANSFERENCIA NEUMATICA

Ha sido fabricado por la firma V.T.T. Technology (Helsinki-Finlandia) y permite el envío de las muestras, su irradiación adyacente al blanco del generador y su retorno directo a la estación de medición. El sistema es comandado a través de un microcomputador Rockwell mediante instrucciones BASIC especiales residentes en memoria.

INTERFACE

Para poder sincronizar el envío de muestras con el inicio y fin de la irradiación, fue necesario construir una interface de tal manera que la señal de arribo de muestra a la posición de irradiación sea interpretada por la computadora, la que a su vez envía una señal al interceptor del haz de deuterones del generador de neutrones. Una vez finalizado el tiempo de irradiación (controlado por software) la interface comanda el cerrado del interceptor y envía la muestra para medición. De esta manera es posible hacer irradiaciones durante tiempos muy precisos y tener la muestra en la estación de conteo en sólo 2,5 segundos.

SISTEMA DE DETECCION

Se emplea el sistema integrado de medición para neutrones y gammas que se muestra en la Fig. 1 (ruta señalada con flechas) y se encuentra localizado en una sala contigua al generador. El rendimiento neutrónico del generador es monitoreado durante la irradiación mediante un contador proporcional de BF_3 .

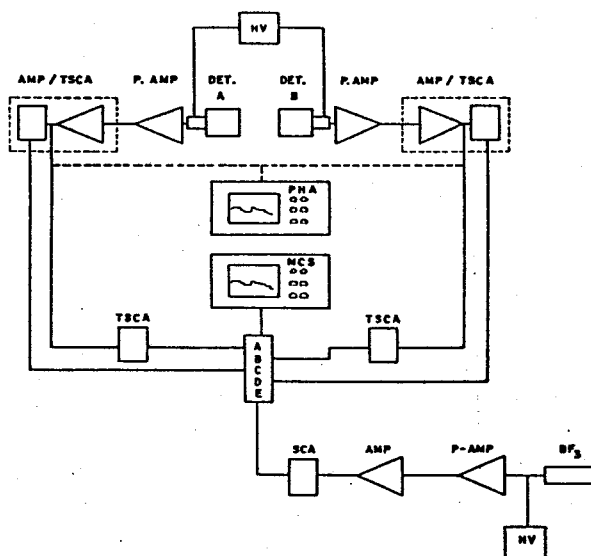


Fig. 1 Sistema integrado de medición

La radiación gamma es contada mediante dos detectores de NaI(Tl) 3" x 3" situados frente a frente. Las señales producidas por estos dos detectores es amplificada empleando dos amplificadores analizadores monacanal que sólo permiten el paso de señales correspondientes a energías comprendidas entre 4.5 y 8 MeV. Las salidas de ambos amplificadores se suman mediante un módulo de coincidencia al cual también está conectada la cadena electrónica asociada al detector de BF₃.

Un analizador multicanal de la firma Canberra modelo Serie 40, operado en el modo multiescalímetro, es empleado para coleccionar, primeramente la información del detector de neutrones y, a continuación, la información del sistema de detección gamma.

Terminada la adquisición los datos son transferidos a una microcomputadora DEC Professional 350.

ADQUISICION Y TRATAMIENTO DE DATOS

El sistema de detección, inicialmente está prefijado para dejar pasar sólo los eventos correspondientes al detector de flujo de neutrones, eventos que son registrados desde unos segundos antes de abrir el interceptor de haz de deuterones para así registrar, en el analizador, toda la historia de irradiación. La irradiación dura 20 segundos y mientras que la muestra está en tránsito hacia la estación de medición se inhibe el paso de señales correspondientes al detector de neutrones para registrar sólo los eventos generados por los detectores de radiación γ , registrándose de esta forma la historia del decaimiento radiactivo del ¹⁶N. Los eventos detectados son almacenados en el analizador para intervalos secuenciales de 0.5 s cada uno; en la figura 2 se muestra el registro típico de una irradiación, entre los canales 15 y 55 están los eventos correspondientes al detector de flujo neutrónico, mientras que a partir del canal 62 en adelante los correspondientes al decaimiento radiactivo del ¹⁶N. Los tiempos típicos de irradiación, espera y contaje son 20,5 y 20 segundos respectivamente.

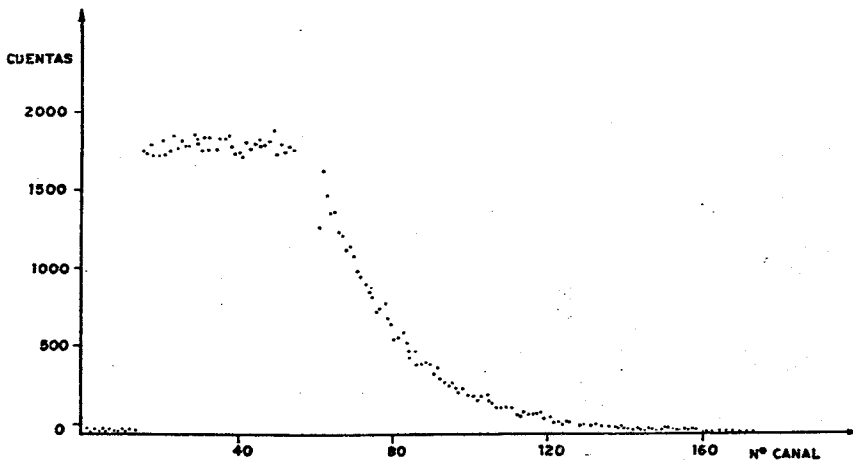


Fig. 2 Espectro en modo multiescalímetro de un patrón de $K_2Cr_2O_7$ se observa la irradiación y el decaimiento del ¹⁶N

Los datos son transferidos a la computadora para ser tratados por el programa OXI escrito en lenguaje BASIC. El programa contiene tres sub-rutinas principales; la primera de ellas denominada ZONAS identifica los canales donde empieza y termina la irradiación, a continuación identifica, como canal inicial de contaje, el siguiente canal con cuentas superiores a un mínimo prefijado siempre y cuando sea mayor que el tiempo de irradiación prefijado por el usuario. Considera terminado el contaje cuando haya transcurrido el tiempo prefijado.

La segunda sub-rutina denominada RAZON DE CONTAJE corrige, por decaimiento durante el contaje y "background", las cuentas acumuladas en cada canal durante el decaimiento del ^{16}N , toma logaritmos a las razones de contaje, hace una regresión lineal ponderada con la estadística de contaje, calcula la razón de contaje a final de irradiación y calcula el período de semidesintegración del radionúclido.

La tercera sub-rutina llamada CORRECCION POR FLUJO calcula el factor de corrección FK, debido a la dependencia temporal del flujo neutrónico, basándose en la historia de la irradiación y en el período de semidesintegración, de acuerdo a la fórmula siguiente :

$$FK = \lambda \sum_{CI}^{CF} X_i e^{\lambda |T - (CF - CI + 1)| DL} \quad (1)$$

donde :

- λ : cte. de desintegración del radionúclido $^{16}\text{N} = 9.719 \times 10^{-2}\text{S}^{-1}$
- X_i : cuentas acumuladas en el canal i
- CI : canal inicial del contaje de neutrones
- CF : canal final del contaje de neutrones
- DL : tiempo de barrido por canal = 0.5 seg.
- T : tiempo a mitad de canal = $(i - CI + 0.5) DL$

El programa principal lee los datos dados por el usuario y controla el uso de las sub-rutinas de tal manera que se siga la secuencia de muestras y patrones establecida de antemano. Asimismo, calcula las concentraciones de oxígeno a través de las relaciones de actividades de acuerdo a la fórmula siguiente :

$$\text{o/o O} = \frac{\left(\frac{RC}{FK}\right)_M \cdot W_o \cdot 100}{\left(\frac{RC}{FK}\right)_P \cdot W_M} \quad (2)$$

donde RC es la razón de contaje a fin de irradiación, FK el factor de corrección por variaciones del flujo neutrónico, W_o el peso de oxígeno en el patrón y W_M el peso de la muestra. Los sub-índices M y P significan muestra y patrón.

La corrección por el oxígeno contenido en los envases de irradiación no se ha efectuado, pues la irradiación de envases vacíos mostró que esta corrección es despreciable.

4.0 RESULTADOS Y DISCUSION

Si bien los envases de irradiación se ubican bien en el sistema de transferencia neumática se efectuó una serie de ensayos, empleando una fuente radiactiva puntual, para asegurarse de tener una excelente reproducibilidad en las posiciones de irradiación y medición. Experimentos previos permitieron igualmente verificar que el empleo de dos detectores de NaI (TI) frente a frente, hace despreciable el error que pudiera cometerse al no rotar la muestra frente al blanco.

A fin de estudiar la reproducibilidad del método se irradió diez veces una muestra de $K_2Cr_2O_7$ obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 1. No se prestó especial énfasis en mantener un flujo neutrónico constante, por lo que esta serie comprende tanto irradiaciones uniformes como irregulares. La excelente precisión alcanzada muestra la bondad de la corrección instrumental de las variaciones del flujo neutrónico.

TABLA 1. *Estudio de reproducibilidad.*

No. Ensayo	Razón de Contaje Corregida (RC/IK)
1	1.8500
2	1.8827
3	1.8092
4	1.8835
5	1.8369
6	1.9388
7	1.7588
8	1.8439
9	1.8881
10	1.8954
$\bar{X} : 1.8587$	
$\sigma_{n-1} : 0.0505$	
$\frac{\sigma_{n-1}}{\bar{X}} \cdot 100 : 2.72 \%$	

En la tabla 2 se muestran los resultados del análisis de oxígeno en diferentes reactivos empleando como patrón $K_2Cr_2O_7$, MERCK, pureza analítica. Salvo en el caso del MnO_2 la buena correspondencia entre los resultados analíticos y los valores calculados muestran que podemos emplear este reactivo como patrón para analizar oxígeno en diferentes materiales. Para el MnO_2 la desviación se explica por la incertidumbre en la pureza especificada, la variabilidad de estequiometría de este compuesto, y la presencia de impurezas que contienen oxígeno de las que sólo se ha tomado en cuenta al SiO_2 .

TABLA 2. *Análisis de oxígeno en reactivos pureza analítica.*

REACTIVO	Oxígeno Determinado * (o/o)	Oxígeno Calculado (o/o)	Error Relativo (o/o)
Urea	27,25±0,80	26,64	+2,29
Carbonato de Calcio	47,76±1,40	47,96	-0,42
Dióxido de Titanio	41,19±1,00	40,05	+2,85
Dióxido de Silicio	53,44±0,63	53,26	+0,34
Dióxido de Manganeso (92o/oMnO ₂ +3o/oSiO ₂)	37,29±0,93	35,46	+5,16
Molibdato de Amonio	36,58±0,45	36,25	+0,91
Sacarosa	51,51±0,62	51,42	+0,18
Fructosa	52,51±1,34	53,29	-0,46

* Promedio de 4 determinaciones.

Las muestras de Carbón analizadas proceden de diversas localidades del país con contenidos de cenizas medio y alto. El análisis de humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo y azufre de estas muestras fue proporcionado por la Pontificia Universidad Católica del Perú y se muestra en la tabla 3. Las cenizas fueron también determinadas en nuestro laboratorio y son mostradas en la tabla 4, conjuntamente con las determinaciones de oxígeno en carbón y cenizas. La primera columna (tabla 4) corresponde al oxígeno medido en el carbón húmedo, la segunda muestra el contenido porcentual de oxígeno en las cenizas mientras que la cuarta contiene el o/o de oxígeno inorgánico fijo contenido en el carbón húmedo y ha sido derivado del contenido de oxígeno en cenizas. En la quinta columna se presenta la diferencia entre el oxígeno en el carbón y el oxígeno inorgánico fijo, el que es interpretado como oxígeno orgánico más oxígeno debido a

TABLA 3. Análisis global de los carbones estudiados*

MUESTRA	Humedad (o/o)	Materia Volátil(o/o)	Cenizas (o/o)	Carbono Fijo (o/o)	Azufre (o/o)
A-1 (Ancash)	5.05	3.92	25.50	65.53	-
A-2 (Ancash)	5.35	3.17	16.62	75.86	-
A-3 (Ancash)	4.49	4.61	28.75	62.15	-
C-1 (Lima)	5.29	3.57	30.76	60.38	1.58
D-1 (Ancash)	2.13	6.42	31.86	59.59	1.30
D-2 (Ancash)	6.45	11.38	34.40	47.77	0.94
D-3 (Ancash)	3.30	7.92	15.24	73.54	1.06
D-4 (Ancash)	4.76	4.30	13.20	77.70	0.80

* PUCP

TABLA 4. Análisis de oxígeno.

MUESTRA	Oxígeno en Carbón Húm(o/o)	Oxígeno en Ceniza (o/o)	Cenizas (o/o)	Ómorg. fijo (o/o Carbón húm)	O _{org} +O _{H2O} (o/o carbón húm)	O _{org} (o/o carbón húm.)
A-1	16.3 ± 0.2	45.9 ± 1.1	25.9	11.9 ± 0.3	4.4 ± 0.3	- 0.1 ± 0.3
A-2	12.1 ± 0.2	46.4 ± 1.2	15.19	7.0 ± 0.2	5.1 ± 0.3	0.3 ± 0.3
A-3	18.3 ± 0.3	47.0 ± 1.6	31.64	14.9 ± 0.5	3.4 ± 0.6	- 0.6 ± 0.6
B-1	47.6 ± 0.6	53.0 ± 1.6	81.68	43.3 ± 1.3	4.3 ± 1.4	-
B-2	29.4 ± 0.3	51.6 ± 2.1	47.00	24.3 ± 1.0	5.1 ± 1.0	-
C-1	22.4 ± 0.3	55.4 ± 1.0	30.25	16.8 ± 0.3	5.6 ± 0.4	0.9 ± 0.4
D-1	22.2 ± 0.3	53.8 ± 1.2	32.28	17.4 ± 0.4	4.8 ± 0.5	2.9 ± 0.5
D-2	30.4 ± 0.4	53.9 ± 1.7	34.91	18.8 ± 0.60	11.6 ± 0.7	5.9 ± 0.7
D-3	15.1 ± 0.3	53.5 ± 1.2	16.76	9.0 ± 0.2	6.1 ± 0.4	3.2 ± 0.4
D-4	14.4 ± 0.3	51.2 ± 1.6	13.22	6.80 ± 0.2	7.6 ± 0.4	3.40 ± 0.40

la humedad. Por diferencia con el oxígeno calculado a partir del contenido de humedad de las muestras se ha construido la última columna y es identificada como oxígeno orgánico.

Análisis separados de calcio muestran que, para los casos analizados, el contenido es menor del 0.37 o/o y para sodio menor que 0.2 o/o, por lo que se desprecia la influencia que puedan tener los carbonatos de Na y Ca en la determinación del oxígeno orgánico. Desde que el oxígeno orgánico se encuentra en pequeñas cantidades y éstas han sido derivadas de otras mediciones, la incertidumbre en estos valores es elevada, aún así es posible afirmar que el contenido de oxígeno orgánico en las muestras rotuladas como A es prácticamente nulo mas no así en las rotuladas con C y D.

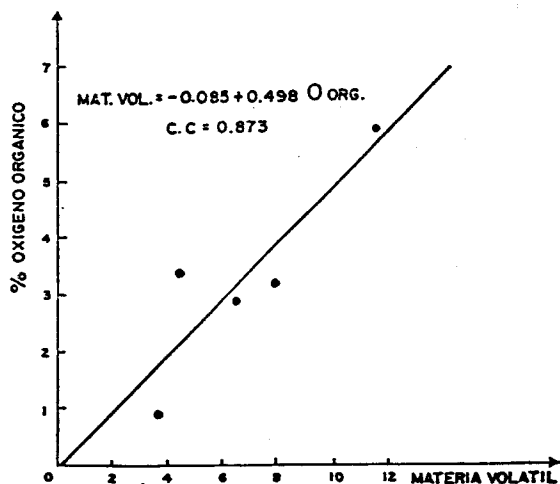


Fig. 3 *Correlación entre la materia volátil y el oxígeno orgánico.*

Es de esperar que el contenido de oxígeno orgánico esté correlacionado con el contenido de materia volátil, por lo que se ha graficado, en la figura 3, el o/o de materia volátil versus el contenido de oxígeno orgánico, encontrando que dicha correlación existe. Si bien es cierto que la precisión de los resultados explican la dispersión en dicha figura, no se debe subestimar el hecho que existe variabilidad en el tipo y cantidad de las especies químicas que contribuyen el contenido de oxígeno orgánico.

El contenido de materia volátil puede servir para estimar el valor del oxígeno orgánico, aunque se requiere mas experimentación para hacer predicciones confiables.

La mayor parte del oxígeno en el carbón proviene de los óxidos de aluminio, silicio y hierro, así como de la humedad presente por lo que se correlaciona con el contenido de humedad y cenizas, tal como se aprecia en la figura 4.

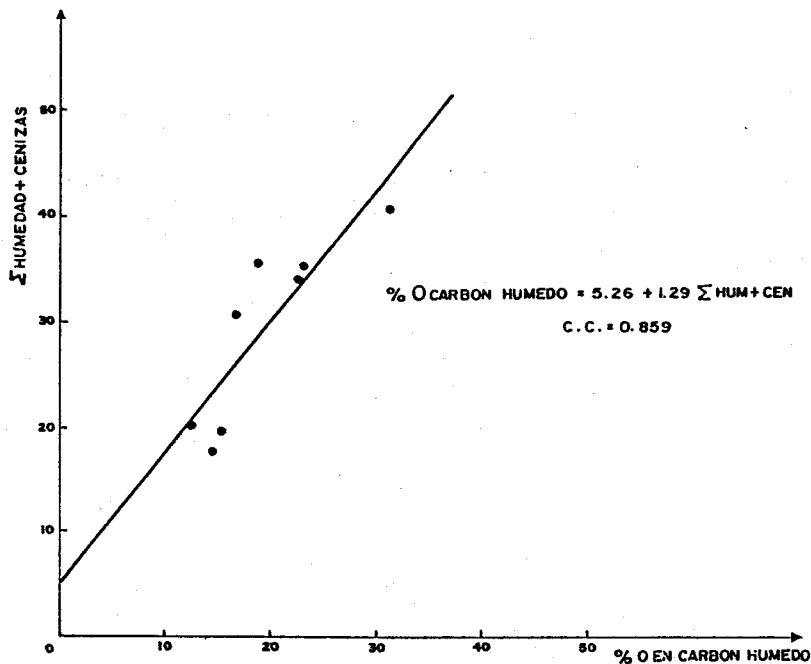


Fig. 4 Correlación entre el oxígeno en el carbón y la humedad y cenizas.

5. CONCLUSIONES

El oxígeno puede ser analizado, de acuerdo al método descrito, con buena precisión y con ventajas substanciales ya que es posible realizarlo en cualquier matriz y sin mayor preparación de muestras que el pulverizado y una buena compactación de las mismas. Por otro lado el que los fotones del ^{16}N sean de muy alta energía hace que sea libre de interferencias y, por el período de semidesintegración muy pequeño, es posible lograr tiempos analíticos muy pequeños ya que cada muestra es irradiada y medida en un lapso de 45 segundos.

El costo de cada análisis es comparable con otros métodos y si consideramos que la práctica común es la de suponer que el oxígeno completa el 100 o/o de los elementos mayores, resulta ser una buena alternativa analítica.

En cuanto a su aplicación en la caracterización del carbón, es muy útil ya que permite completar el análisis de los elementos mayores y permite inferir sobre la naturaleza de los compuestos volátiles y las cenizas. La determinación de oxígeno orgánico no es una práctica común en el análisis de carbones, pero es importante desde el punto de vista del uso de los carbones gasificados y en la producción de combustibles sintéticos, así como en la investigación del proceso de formación del carbón.

REFERENCIAS

- [1] S. SZEGEDI, F. DIVOS, *J. Radioanal. Chem., Articles*, 81/2 (1984) 317-322
- [2] F. TESCHKE, H. WANKE. *Radiochem. Radioanal. Letters* 18 (5) 341-348 (1974)
- [3] W. D. EHMANN, J. W. MORGAN, *Geochim. Cosmochim. Acta* 34, Suppl. 1 (1970) 1071-1079.
- [4] L. L. CHYL, W. D. JAMES, W. D. EHMANN, G. H. SUN, C. E. HAMRIN. *Proc. Fourth Conference on the Scientific and Industrial Applications of Small Accelerators* (1976) 281-287.
- [5] C. ERALDO CALADO. *Dissertacao de Mestre Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo* (1977)
- [6] E. LAVENERE MACHADO. *Dissertacao de Mestre, Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo*.
- [7] H. FORSTER. *J. Radioanal. Chem., Vol* 58 (1980) 205-213
- [8] J. W. MORGAN, W. D. EHMANN, *Anal. Chim. Acta* 49 (1970) 287-299
- [9] W. D. JAMES. M. S. AKANNI, *IEEE Transactions on Nuclear Science Vol. NS-30, No. 2, April* 1983.
- [10] P. E. FILPUS-HUYCKX, V. O. OGUGBUAJA, *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B24/25* (1987) 1017-1020.
- [11] G. ERDTMANN, W. SOYKA, *The Gamma Rays of the Radionuclides, Verlag Chemie, Weinheim, 1979*.
- [12] J. R. VOGT, W. D. EHMANN, *Proc. Int. Conf. on Modern Trends in Activation Analysis* (1965).

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) que financió parcialmente este trabajo así como al Ing. Carlos Soldi, quien gentilmente suministró las muestras, por su valiosa asesoría durante la ejecución del trabajo. Agradecemos también el apoyo brindado por el personal del Generador de Neutrones del IPEN y a la Srta. Roxani Donayre.

Determinación de oxígeno en carbones empleando análisis por activación con neutrones de 14 MeV por Aurelio Arbildo, Ricardo Espinosa, Carmen Poma, José Eyzaguirre, Herminio Hinojosa se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.