



Centro de Investigación de Ciencia Aplicada y
Tecnología Avanzada-Instituto Politécnico
Nacional

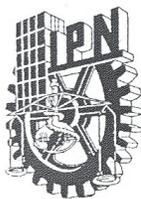
TRABAJO DE TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN TECNOLOGIA AVANZADA.

**TITULO: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES
TERMOLUMINISCENTES Y OPTICAS DE FLUORUROS
DOBLES DE POTASIO E ITRIO DOPADO CON LA TIERRAS
RARAS.**

PRESENTA: *LIC. EN FIS. ALAN AUGUSTO GALLEGOS CUELLAR.*

Director de Tesis: Dr. Juan Azorín Nieto.

**Codirector de Tesis: Dr. José Antonio Irán Díaz
Góngora.**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México D.F. el día 01 del mes Agosto del año 2007, el (la) que suscribe Alan Augusto Gallegos Cuellar alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B041028, adscrito a C.I.C.A.T.A-Unidad Legaria, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Juan Azorín Nieto y cede los derechos del trabajo intitulado "Estudio de las propiedades termoluminiscentes y ópticas de fluoruros dobles de potasio e itrio dopado con la tierras raras", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección f14agc@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Alan Augusto Gallegos Cuellar
Nombre y firma

ACTA DE REVISIÓN.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 11 horas del día 8 del mes de Agosto del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN para examinar la tesis de grado titulada:
"ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TERMOLUMINISCENTES Y OPTICAS DE FLUORUROS DOBLES DE POTASIO E ITRIO DOPADO CON LA TIERRAS RARAS"

Presentada por el alumno:

Gallegos
Apellido paterno

Cuellar
materno

Alan Augusto
nombre(s)

Con registro:

B	0	4	1	0	2	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRIA EN TECNOLOGIA AVANZADA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

Dr. Juan Azorín Nieto

Codirector de tesis

Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora

Dr. Teodoro Rivera Montalvo

Dr. Manuel García Hipólito

Dra. Rocio Alejandra Muñoz Hernández

Dr. Miguel Angel Aguilar Frutis

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. José Antonio Irán Díaz Góngora

CENTRO DE INVESTIGACION EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGIA AVANZADA
DEL IPN

En Memoria de mi Hijo Alan Benjamín, por la
felicidad de haber compartido ese instante de
tiempo y espacio, y por todas las alegrías que
juntos vivimos, Te Amo Benjo.

Tu papi
Recuerda The life is a highway.
Tú Siempre en el Corazón y la Mente.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco toda la paciencia, los consejos y las platicas a mis mentores el Dr. Juan Azorín Nieto, el Dr. José Antonio Díaz Góngora y el Dr. Teodoro Rivera Montalvo.

Agradezco a Dios por mi familia, y a ella por la paciencia, amor y apoyo incondicional para sacar adelante este proyecto, los amo.

Agradezco a mi compadre y hermano el Fis. Mat. Oscar Gómez Baltasar y a sus hija por su amistad y apoyo en cualquier momento.

Agradezco a la Dr. Rocio A. Muños Hernández y al Dr. José A. Calderón Arenas su apoyo en el inicio de esta empresa.

Agradezco a la U.A.M.-Iztapalapa por permitirme la utilización de sus instalaciones, así como también a mis compañeros de laboratorio por sus enseñanzas, en especial a M.T. A. Eugenio F. S. Torijano Cabrera.

Agradezco al personal administrativo de CICATA unidad Legaría por su apoyo, en especial a Lety Cardona por sus regaños y ayuda.

Agradezco al Dr. Rodrigo Meléndez Amavizca el espectro de emisión TL facilitado para este trabajo.

I. INDICE.

	PAG.
I. INDICE.	5
II. GLOSARIO.	7
III. RELACION DE CUADROS, GRAFICAS ILUSTRACIONES.	E 8
IV. RESUMEN.	16
V. INTRODUCCIÓN.	17
VI. ANTECEDENTES.	19
1. Conceptos Básicos de Luminiscencia.	19
2. Termoluminiscencia (TL).	23
3. La cinética de la curva TL.	34
4. Modelo de McKeever para un dosímetro.	35
VII. JUSTIFICACIÓN.	39
VIII. OBJETIVO.	39
IX. MATERIALES Y METODO EXPERIMENTAL.	40
1. Materiales.	40
2. Método Experimental.	41
3. Métodos para determinación de los parámetros cinéticos.	42
i. Método de decaimiento isotérmico a diferentes temperaturas.	42
ii. Método de la intensidad máxima TL media de la curva TL (Método de la forma del pico).	43
iii. Método del elevamiento inicial de la curva TL (Método de la forma del pico TL).	48
iv. Factor Pre-exponencial.	49
v. Ecuación de Arrhenius.	49
X. RESULTADOS.	49

1.	Propiedades dosimétricas.	49
a.	Curvas de brillo.	49
b.	Respuesta TL en función dosis absorbida por pico TL.	51
2.	Curvas de brillo para parámetros cinéticos por métodos de la forma del pico y decaimiento isotérmico a diferentes temperaturas.	58
i.	K₂YF₅: Tb 0.8%.	58
ii.	K₂YF₅: Tb 0.99% (XVII-10).	66
iii.	K₂YF₅: Tb 0.8% (85).	70
XI.	ANALISIS.	73
1.	Propiedades dosimétricas.	73
a)	Curvas de brillo.	75
b)	Respuesta TL en función dosis absorbida por pico TL.	76
c)	Sensibilidad entre materiales K₂YF₅: 0.8% y 0.99% Tb.	78
2.	Parámetros cinéticos.	80
i.	Métodos de la forma del pico.	80
ii.	Método de decaimiento isotérmico.	99
XII.	CONCLUSIONES.	110
XIII.	RECOMENDACIONES.	115
XIV.	SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO.	116
XV.	BIBLIOGRAFIA.	116
XVI.	ANEXO.	117

II. GLOSARIO.

a. Termoluminiscencia (TL):

Se dice de un fenómeno fosforescente térmicamente inducido, para la estimulación de los portadores de carga atrapados en los estados metaestables sobre el nivel de Fermi.

b. Dosimetría:

Se dice de la medida de la dosis de radiación absorbida por un material TL.

c. Sensibilidad:

Es la medida de la respuesta de la dosis absorbida por material comparada contra un material estándar o bien contra el mismo material con alguna variante.

d. Curva de brillo TL:

Curva de respuesta del material al ser estimulado térmicamente para observar la termoluminiscencia, presentando una grafica en un sistema coordenado rectangular de con la intensidad en unidades arbitrarias en las ordenadas y la temperatura de estimulación en la abscisas. En esta curva se presenta el efecto macroscópico de los estados atrapantes como picos distribuidos en la curva, pueden ser uno o varios, los cuales tiene un máximo de intensidad a una temperatura específica, que es básicamente la temperatura de estimulación del estado atrapante dominante.

e. Radiación:

Energía en forma de fotón o partícula de una frecuencia determinada, consecuencia de un decaimiento nuclear o bien de una recombinación electrónica.

f. mGy:

$10^{-3} \text{ Gy} = 10^{-3} \text{ Joule/Kg.}$

g. Pico TL:

Estados meta estables sobre el nivel de Fermi del material TL convolucionan en la curva de brillo como un pico de máxima intensidad a una temperatura específica, llamada temperatura máxima de intensidad de ese pico, y que representa el efecto macroscópico de estos varios estados atrapantes.

h. Parámetros cinéticos:

Se dice de la energía de activación E_t de la trampa o estado meta estable atrapante dominante, de su factor pre exponencial (corresponde indirectamente con el tiempo de permanencia de un electrón en estado atrapante) y la densidad de estados atrapantes saturados al momento de la estimulación termal del material.

i. Trampas TL:

Se refiere a los estados meta estables atrapantes que se encuentran sobre el nivel de Fermi del material TL.

j. Tratamiento Termal

Método experimental previo aplicable al material TL antes del etapa de calentamiento, que involucra la aplicación de calor para aumentar la temperatura del material.

k. Fosforescencia:

Fenómeno que presentan algunos materiales que al se sometido a un campo de radiación presentan una luminiscencia de corta duración.

l. Pruebas dosimétricas:

Se refiere a los criterios descritos por el modelo de Mckeever para un dosímetro termoluminiscente.

m. Dosis absorbidas.

Es la cantidad de energía absorbida durante la irradiación por unidad de masa del material utilizado, medida en gray.

n. Saturación:

Instante en el cual todas trampas de un tipo disponibles se encuentran llenas, observándose el efecto macroscópico como un solo pico a su máxima intensidad, para su posterior liberación.

o. Radiación Ionizante:

Energía de una frecuencia determinada capaz de ionizar un átomo.

p. Orden Cinético de la curva de brillo TL:

Se refiere geoméricamente a la forma del pico observado en la curva de brillo, siendo más simétrico a derecha e izquierda del máximo del pico entonces se dice que es de orden dos. Cuando la parte o ala izquierda del pico es más prominente que la derecha se dice de orden uno, desde el punto de vista físico se refiere a un proceso del tipo fosforescente, como una primera aproximación de la forma en que se presenta el proceso microscópico en el material después de irradiarlo y estimularlo mediante calentamiento.

q. Reatrapamiento:

Se refiere en general a un segundo atrapamiento de un electrón liberado por una trampa previamente.

r. Hoyos:

Se refiere a las trampas o estados meta estables atrapante sobre el nivel de Fermi.

III. RELACIÓN DE CUADROS, GRÁFICAS E ILUSTRACIONES.

FIGURAS:

1. EJEMPLO DE CURVAS DE BRILLO DE VARIOS MATERIALES TL.
2. ESQUEMA DE VON HIPPEL
3. ESQUEMA DE TRASFERENCIA RADIATIVA.
4. ESQUEMA DE PROBABILIDADES DE UNA TRASFERENCIA ENERGETICA SEMICLASICA.
5. PROCESO MICROSCOPICO DE LA TL.
6. ESQUEMA DE EXPLICACION DE UN PROCESO TSP.
7. ESQUEMA DEL PROCESO TPS MICROSCOPICAMENTE SEGÚN RANDALL Y WILKINS.
8. PROPIEDADES DE LA ECUACION DE PRIMER ORDEN CINETICO DE RANDALL-WILKINS.
9. PROPIEDADES DE LA ECUACION DE SEGUNDO ORDEN CINETICO DE GARLICK-GIBSON.
10. GRAFICA DE INTENSIDAD VS. LONGITUD DE ONDA DE LA ENERGIA INCIDENTE VS. TEMPERATURA DE RECOCIDO, PARA UN MATERIAL TL IRRADIADO CON RX.
11. EJEMPLOS DE LA FUNCION DE RESPUESTA DE LA DOSIS PARA PICOS DE TRES MATERIALES TLD.
12. GRAFICA DE ENERGIA VS Z_{eff} EN LA QUE SE PRESENTAN LOS PROCESOS DE INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA.

13. POTENCIA DE FRENADO POR UNIDAD DE MASA PARA PARTICULAS BETA EN DISTINTOS ELEMENTOS.
14. RAZON DE INTENSIDAD CONTRA DISTANCIA DE PENETRACION EN UN MATERIAL TLD.
15. SENSIBILIDADES RELATIVAS DE MATERIALES COMERCIALES: a) TLD-200, b) TLD-400, c) TLD-500 COMPARADAS A d) $K_2YF_5: Tb^{+3}$ (10%) EXPUESTOS A 77 kVp.
16. DECAIMIENTO FOSFORESCENTE DEL KCl: Sn A DIFERENTES TEMPERATURAS.
17. GRAFICA DE $[I_0/I(t)]^{1/2}$ VS. t PARA EL DECAIMIENTO FOSFORESCENTE DE LA DOLOMITA NATURAL.
18. GRAFICA PARA LA DETERMINACION DEL ORDEN CINETICO DE LA CURVA DE BRILLO A PARTIR DE LA RELACION FACTOR DE SIMETRIA VS. ORDEN CINETICO, DE ACUERDO A CHEN Y KRISTIANPOLLER¹².
19. LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE CARACTERIZAN UN PICO AISLADO¹⁴.
20. REPRESENTACIÓN GRAFICA DE CURVA DE PRIMER ORDEN CINÉTICO Y SEGUNDO ORDEN CINÉTICO.
21. a. CURVA DE BRILLO TL DE REFERENCIA DEL K_2YF_5 : 0.8% TB. b. CURVA DE BRILLO TL DE REFERENCIA DEL K_2YF_5 : 0.99% TB (XVII-10). c. CURVA DE BRILLO TL DE REFERENCIA DEL K_2YF_5 : 0.99% TB (85).
22. a. AJUSTE LINEAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.8% TB PARA EL PICO $T = 434$ °K. b. AJUSTE POLINOMIAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.8% TB PARA EL PICO $T = 434.4$ °K.
23. a. AJUSTE LINEAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.8% TB PARA EL PICO $T = 483.94$ °K. b. AJUSTE POLINOMIAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.8% TB PARA EL PICO $T = 483.94$ °K.
24. a. AJUSTE LINEAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.8% TB PARA EL PICO $T = 543.71$ °K. b. AJUSTE POLINOMIAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.8% TB PARA EL PICO $T = 543.71$ °K.
25. a. AJUSTE LINEAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.99% TB PARA EL PICO $T = 419.53$ °K. b. AJUSTE POLINOMIAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.99% TB PARA EL PICO $T = 419.53$ °K.
26. a. AJUSTE LINEAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.99% TB PARA EL PICO $T = 460.65$ °K. b. AJUSTE POLINOMIAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.99% TB PARA EL PICO $T = 460.65$ °K.
27. a. AJUSTE LINEAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.99% TB PARA EL PICO $T = 553.4$ °K. b. AJUSTE POLINOMIAL PARA LA RESPUESTA A LA DOSIS ABSORBIDA POR K_2YF_5 : 0.99% TB PARA EL PICO $T = 553.4$ °K.
28. a. CURVA DE BRILLO DEL K_2YF_5 : 0.8 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO. b. CURVA DE BRILLO DEL PICO AISLADO DESPUÉS DE UN DECAIMIENTO ISOTÉRMICO DEL K_2YF_5 : 0.8 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$.
29. a. CURVA DE BRILLO DEL K_2YF_5 : 0.8 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y LA CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO. b. CURVA DE BRILLO DEL PICO AISLADO DESPUÉS DE UN DECAIMIENTO ISOTÉRMICO DEL K_2YF_5 : 0.8 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$.
30. a y b. MUESTRAN LAS CURVAS DE BRILLO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB DESPUÉS DE SER IRRADIADO CON UN FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y SU CURVA DE ESTIMULACIÓN DE TRAMPAS A 100 °C, DURANTE 31 MIN.

31. a y b. MUESTRAN LAS CURVAS DE BRILLO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB DESPUÉS DE SER IRRADIADO CON UN FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y SU CURVA DE ESTIMULACIÓN DE TRAMPAS A $100\text{ }^\circ\text{C}$, DURANTE 53 MIN.
32. a y b. MUESTRAN LAS CURVAS DE BRILLO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB DESPUÉS DE SER IRRADIADO CON UN FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y SU CURVA DE ESTIMULACIÓN DE TRAMPAS A $100\text{ }^\circ\text{C}$, DURANTE 64 MIN.
33. a y b. MUESTRAN LAS CURVAS DE BRILLO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB DESPUÉS DE SER IRRADIADO CON UN FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y SU CURVA DE ESTIMULACIÓN DE TRAMPAS A $100\text{ }^\circ\text{C}$, DURANTE 104 MIN.
34. SE OBSERVAN LAS CURVAS DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO A $100\text{ }^\circ\text{C}$ DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, EN DISTINTOS INSTANTE.
35. SE OBSERVAN LAS CURVAS DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO A $125\text{ }^\circ\text{C}$ DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, EN DISTINTOS INSTANTE.
36. SE OBSERVAN LAS CURVAS DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO A $150\text{ }^\circ\text{C}$ DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, EN DISTINTOS INSTANTE.
37. a. CURVA DE BRILLO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO. b. CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y.
38. a. CURVA DE BRILLO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO. b. CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y CURVA.
39. a. CURVA DE BRILLO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO. b. CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$.
40. a. CURVA DE BRILLO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO. b. CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$.
41. a. CURVA DE BRILLO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$ Y CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO. b. CURVA DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO DEL K_2YF_5 : 0.9 % TB DESPUÉS DE SE IRRADIADO POR UNA FUENTE DE $^{90}SR/^{90}Y$.
42. SE OBSERVAN LAS CURVAS DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO A $125\text{ }^\circ\text{C}$ DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.99% TB, EN DISTINTOS INSTANTE.
43. SE OBSERVAN LAS CURVAS DE DECAIMIENTO ISOTÉRMICO A $150\text{ }^\circ\text{C}$ DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.99% TB, EN DISTINTOS INSTANTE.
44. NIVELES DE ENERGÍA INVOLUCRADOS EN LA COMPETICIÓN DURANTE LA ETAPA DE CALENTAMIENTO, M ES LA CONCENTRACIÓN DE HOYOS EN LOS CENTROS DE RECOMBINACIÓN; N_1 , N_2 SON LAS CONCENTRACIONES DE TRAMPAS TL ACTIVAS, TRAMPAS COMPETIDORAS, RESPECTIVAMENTE; N_1 Y N_2 SON LAS CONCENTRACIONES DE ELECTRONES EN ESAS TRAMPAS, RESPECTIVAMENTE; A_1 , A_2 SON LAS PROBABILIDADES DE ATRAPAMIENTO EN LOS NIVELES 1 Y 2, RESPECTIVAMENTE; A_M ES LA PROBABILIDAD DE RECOMBINACIÓN; N_C ES LA CONCENTRACIÓN DE ELECTRONES LIBRES EN LA BANDA DE CONDUCCIÓN.

45. . CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA LOS PICOS EN $T_M = 546.9$ Y 497.4 °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO Y TERCER PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB DESVANECIDA A $T = 373.15$ °K.
46. CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA LOS PICOS EN $T_M = 551.65$ Y 433.15 °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO Y TERCER PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB DESVANECIDA A $T = 373.15$ °K.
47. CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA EL PICO EN $T_M = 430.9$ °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB CALCINADA 31 MIN. A 373.15 °K.
48. CURVA DE REGRESIÓN AJUSTADA DEL LNI VS. $1/T$ PARA EL PICO EN $T_M = 429.15$ °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB CALCINADO 51 MIN. A 373.15 °K.
49. CURVA DE REGRESIÓN AJUSTADA DEL LNI VS. $1/T$ PARA EL PICO EN $T_M = 430.9$ °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB CALCINADO 51 MIN. A 373.15 °K.
50. . CURVA DE REGRESIÓN AJUSTADA DEL LNI VS. $1/T$ PARA EL PICOS EN $T_M = 420.4$ °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB CALCINADO 104 MIN. A 373.15 °K.
51. CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA LOS PICOS EN $T_M = 549.9$ Y 492.15 °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO Y TERCER PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.9% TB DESVANECIDO A $T = 373.15$ °K.
52. . CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA LOS PICOS EN $T_M = 549.9$ Y 492.15 °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO Y TERCER PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.9% TB DESVANECIDO A $T = 373.15$ °K.
53. CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA LOS PICOS EN $T_M = 528.9$ Y 422.15 °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO Y TERCER PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.9% TB DESVANECIDO A $T = 373.15$ °K.
54. CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA LOS PICOS EN $T_M = 556.9$ Y 416.9 °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO Y TERCER PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.99% TB DESVANECIDO A $T = 373.15$ °K.
55. CURVAS DE REGRESIÓN AJUSTADAS DEL LNI VS. $1/T$ PARA LOS PICOS EN $T_M = 553.4$ Y 422.15 °K QUE CORRESPONDEN AL PRIMERO Y TERCER PICO DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.99% TB DESVANECIDO A $T = 373.15$ °K.
56. CURVAS DE LN (I/I_0) VS T PARA EL PICO UBICADO EN $T_M = 422.15$ °K, DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
57. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS $1/T$ PARA EL PICO 422.15 °K DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, TRATADA POR LE MODELO DE GARLICK-GIBSON.
58. CURVAS DE LN (I/I_0) VS T PARA EL PICO UBICADO EN $T_M = 464.15$ °K, DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
59. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS $1/T$ PARA EL PICO 464.15 °K DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, TRATADA POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
60. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I_0) VS T PARA EL PICO UBICADO EN $T_M = 520.15$ °K, DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
61. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS $1/T$ PARA EL PICO 520.15 °K DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, TRATADA POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
62. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I_0) VS T PARA EL PICO UBICADO EN $T_M = 422.15$ °K, DEL MATERIAL K_2YF_5 : 0.8% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE TAKEUCHI.

63. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS 1/T PARA EL PICO 422.15 °K DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.8% TB, TRATADA POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
64. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I₀) VS T PARA EL PICO UBICADO EN T_M= 464.15 °K, DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.8% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
65. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS 1/T PARA EL PICO 464.15 °K DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.8% TB, TRATADA POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
66. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I₀) VS. T PARA EL PICO UBICADO EN T_M = 520.15 °K, DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.8% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
67. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS. 1/T PARA EL PICO 520.15 °K DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.8% TB, TRATADA POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
68. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I₀) VS T PARA EL PICO UBICADO EN T_M= 418.65 °K, DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
69. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS 1/T PARA EL PICO 418.65 °K DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADA POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
70. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I₀) VS T PARA EL PICO UBICADO EN T_M= 460.65 °K, DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
71. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS 1/T PARA EL PICO 418.65 °K DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADA POR EL MODELO DE GARLICK-GIBSON.
72. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I₀) VS T PARA EL PICO UBICADO EN T_M= 418.65 °K, DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
73. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS 1/T PARA EL PICO 418.65 °K DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADA POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
74. CURVAS DE AJUSTE DE LN (I/I₀) VS T PARA EL PICO UBICADO EN T_M= 418.65 °K, DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADAS POR EL MODELO DE TAKEUCHI.
75. CURVA DE AJUSTE DE LN P VS 1/T PARA EL PICO 460.65 °K DEL MATERIAL K₂YF₅: 0.99% TB, TRATADA POR EL MODELO DE TAKEUCHI.

TABLAS:

1. Expresiones mas “fiables” para la determinación de la energía de activación de una trampa relacionada a un pico TL aislado¹³.
2. Se presentan los parámetros obtenidos para la temperatura del máximo de emisión t_m, las temperaturas para la emisión media t₁ y t₂ necesarias para calcular la desviación izquierda y derecha τ, δ, y el ancho medio ω de un pico TL del material k₂yf₅: 0.8% Tb para aplicar el método de la forma del pico. fp: método de la forma del pico; ii: método de la elevación inicial.
3. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K₂YF₅: 0.8% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 100 °C.
4. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K₂YF₅: 0.8% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 125 °C.
5. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K₂YF₅: 0.8% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 150 °C.
6. Se presentan los parámetros obtenidos para la temperatura del máximo de emisión T_m, las temperaturas para la emisión media T₁ y T₂ necesarias para calcular la desviación izquierda y derecha

τ , δ , y el ancho medio ω de un pico TL del material K_2YF_5 : 0.9% Tb para aplicar el método de la forma del pico. FP: Método de la forma del pico; II: método de la elevación inicial.

7. Se presentan los parámetros obtenidos para la temperatura del máximo de emisión T_m , las temperaturas para la emisión media T_1 y T_2 necesarias para calcular la desviación izquierda y derecha τ , δ , y el ancho medio ω de un pico TL del material K_2YF_5 : 0.99% Tb para aplicar el método de la forma del pico. FP: Método de la forma del pico; II: método de la elevación inicial.

8. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 125 °C.

9. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 150 °C.

10. Descripción de los picos para las curvas de brillo TL de los materiales K_2YF_5 : 0.8%, 0.9%, 0.99% Tb.

11. Respuesta lineal y polinómica de orden dos para los picos observados de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

12. Comparativo de la respuesta de la dosis absorbida para el primer pico de las curvas de brillo de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

13. Comparativo de la respuesta de la dosis absorbida para el segundo pico de las curvas de brillo de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

14. Comparativo de la respuesta de la dosis absorbida para el tercer pico de las curvas de brillo de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

15. Energías de activación de las trampas ubicadas por temperatura para el material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

16. Datos correspondientes a T_1 , T_2 , T_m , τ , δ , ω para el pico ubicado en promedio en 538.9°K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

17. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

18. Datos correspondientes a T_m , b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

19. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

20. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

21. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 538.9 °K en promedio del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

22. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

23. Datos correspondientes a T_1 , T_2 , T_m , τ , δ , ω para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

24. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

25. Datos correspondientes a T_m , b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

26. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

27. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.
28. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 476.77 °K en promedio del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.
29. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.
30. Resultados de las energías de activación de las trampas ubicada por temperatura para los materiales K_2YF_5 : 0.9% y 0.99% Tb por el método de la forma del pico.
31. Datos correspondientes a T_1 , T_2 , T_m , τ , δ , ω para el pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
32. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
33. Datos correspondientes a T_m , b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
34. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
35. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
36. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 541.73 °K en promedio del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
37. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
38. Datos correspondientes a T_1 , T_2 , T_m , τ , δ , ω para el pico ubicado en promedio en 481.65 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
39. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 481.65 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
40. Datos correspondientes a T_m , b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 481.65 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
41. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 481.65 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
42. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 481.65 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
43. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 481.65 °K en promedio del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
44. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 481.65 °K del material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
45. Datos correspondientes a T_1 , T_2 , T_m , τ , δ , ω para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K_2YF_5 : 0.99% Tb.
46. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K_2YF_5 : 0.99% Tb.
47. Datos correspondientes a T_m , b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K_2YF_5 : 0.99% Tb.
48. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K_2YF_5 : 0.99% Tb.
49. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K_2YF_5 : 0.99% Tb.

50. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 553.4°K en promedio del material K_2YF_5 : 0.99% Tb.
51. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 553.4°K del material K_2YF_5 : 0.99% Tb.
52. Resultados del calculo de la energía de activación por el método de incremento inicial, para el material K_2YF_5 : 0.8% Tb.
53. Resultados del calculo de la energía de activación por el método de incremento inicial, para el material K_2YF_5 : 0.9% Tb.
54. Resultados del calculo de la energía de activación por el método de incremento inicial, para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb.
55. Energía de activación del material K_2YF_5 : 0.8% Tb por método de desvanecimiento isotérmico.
56. Energía de activación del material K_2YF_5 : 0.99% Tb por método de desvanecimiento isotérmico.
57. Resultados para el calculo de E_t , S, τ y n_0 para el pico ubicado en 538.9°K del material K_2YF_5 : 0.8%.
58. Resultados para el calculo de E_t , S y τ para el pico ubicado en 476.775°K del material K_2YF_5 : 0.8%.
59. Resultados para el calculo de E_t , S y τ para el pico ubicado en 541.73°K del material K_2YF_5 : 0.9%.
60. Resultados para el calculo de E_t , S y τ para el pico ubicado en 481.65°K del material K_2YF_5 : 0.9%.
61. Resultados para el calculo de E_t , S y τ para el pico ubicado en 553.4°K del material K_2YF_5 : 0.99%.
62. Energía de activación del material K_2YF_5 : 0.8% Tb por método de desvanecimiento isotérmico.
63. Energía de activación del material K_2YF_5 : 0.99% Tb por método de desvanecimiento isotérmico.
64. Energías de activación del material K_2YF_5 dopado con Tb calculadas por diferentes métodos y modelos.
65. Espectro de emisión TL del K_2YF_5 :Tb.
66. Espectro fotoluminiscente de K_2YF_5 :Tb.

IV. RESUMEN.

En la búsqueda de materiales termoluminiscentes (TL) para uso en dosimetría personal, se estudio diferentes materiales tales como el fluoruro de litio dopado con magnesio y titanio (LiF: Mg, Ti), el cual a sido estudiado y usado como material de referencia por su buena equivalencia con el tejido aunque tenga pobre sensibilidad, esto ha generado la necesidad de buscar materiales que muestren una mejora considerable en cuanto a su respuesta TL. En esta búsqueda los fluoruros dobles como el fluoruros doble de litio potasio e itrio dopado con praseodimio (LiKYF₅: Pr) y el fluoruro doble de potasio e itrio dopado con terbio (K₂YF₅: Tb) muestran una alternativa con muchas ventajas, por su aumento de la sensibilidad al ser dopados con esas tierras raras en diferentes porcentajes.

En este trabajo de investigación se determino algunas características dosimétricas como son la forma de curva de brillo TL para poder determinar la propiedad TL expresadas por los parámetros cinéticos de la curva de brillo TL: Energía de activación E_t de los estados atrapantes y el tiempo de permanencia en estos meta estados dado por el factor pre exponencial s del material TL: fluoruro doble de potasio e itrio dopado con terbio (K₂YF₅: Tb) al 0.8%, 0.9% y 0.99%. También a este material TL se le caracterizo estudiando la respuesta TL en función de la dosis y el tiempo de decaimiento del material TL.

Las curvas de brillo TL obtenidas en el lector, después de ser sometidos al tratamiento termal, fueron estudiadas primeramente por el método de la forma de la curva específicamente por los modelos de: Primera aproximación de Chen y Modificada de Chen, Aproximación de Lushchik corregida y Aproximación de Grossweiner, para la determinación de los parámetros cinéticos E_t y s .

Posteriormente se determinaron nuevamente los parámetros cinéticos de curva de brillo TL para las muestras K₂YF₅: Tb 0.8% y K₂YF₅: Tb 0.99% por el método de decaimiento “fosforescente”, observándose curvas de brillo atípicas, asociadas posiblemente a una “competencia” entre las trampas visibles, durante la etapa de calentamiento. Esta puede ser explicada por la respuesta a la dosis no lineal a dosis “grandes” absorbidas ($ITL \propto D^2$), que puede ser asociada a una **termo-transferencia de energía entre estados atrapantes durante la etapa de calentamiento**.

ABSTRACT.

In the search for a new thermoluminescence materials which will be used in personal dosimetry, many different materials as lithium fluoride doped with magnesium and titanium (LiF:Mg,Ti), which has been studied and used as standard material due to its good tissue equivalence, in despite of having poor sensitivity. This fact has generated the necessity of searching new materials showing better TL response to the absorbed dose. In this search complex fluorides as the fluoride of lithium potassium and yttrium doped with praseodymium (LiKYF₅:Pr) and the double fluoride of potassium and yttrium doped with terbium (K₂YF₅:Tb) are being studied as an alternative with a lot advantages over other materials, due to its increased sensitivity when is doped with different percentages of rare earths.

In this research the glow curve of the double flouride of potassium and yttrium doped with terbium (K₂YF₅:Tb) at 0.8%, 0.9% and 0.99% has been studied to determine the kinetic parameters: activation energy E_t of trapping states, pre-exponential factor s of the TL material. The TL response as a function of absorbed dose and the fading of the material TL were also studied.

The kinetic parameters were determined using two different methods: the glow curve shape method (Grossweiner, Lushchik and Chen Models) and isothermal decay method (room temperature (RT) and temperatures higher than RT).

Similar values of activation energy were obtained using both two methods. Atypical behavior of the glow curve was observed during heating. This behavior could be associated to the competition between trapping states. This competition could be explained due that the no linearity of TL response as a function of absorbed dose of the material which could be due to a thermo-transference of energy among the trapping states during heating

V.INTRODUCCIÓN.

El estudio de nuevos materiales termoluminiscentes TL con posibles usos en dosimetría personal exige una caracterización dosimétrica detallada.

Así tal caracterización dosimétrica nos da la base de un conjunto de cualidades que enmarcan las propiedades TL de un material TL específico.

Dentro de las características dosimétricas sugeridas a estudiar por McKeever y colaboradores⁴ se encuentran: Forma de la curva de brillo, Respuesta TL a la dosis absorbida, Sensibilidad y Respuesta a la energía. Por lo que hablar de la forma de la curva de brillo TL, se refiere a la representación grafica de la intensidad de la luz liberada al estimular los electrones entrampados contra el intervalo de temperaturas donde se piensa se pueden estimular la liberación de los electrones entrampados, se ha observado que esta característica es como la huella digital de cada material TL en estudio.

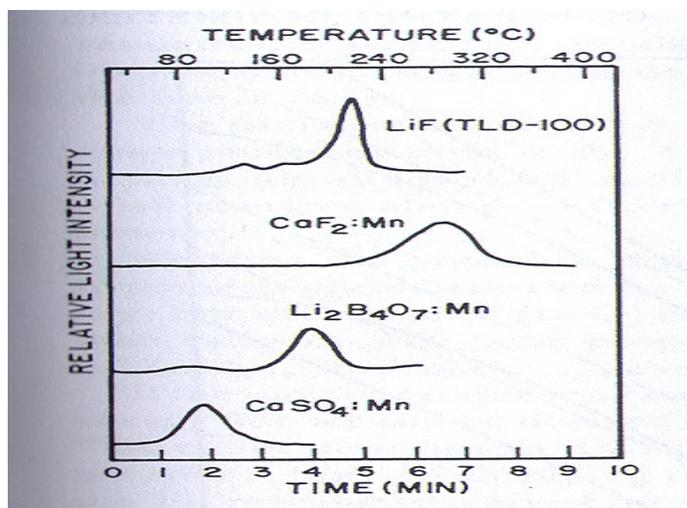


Fig. 1 Ejemplo de curvas de Brillo TL de LiF, CaF₂: Mn, Li₂B₄O₇: Mn, CaSO₄: Mn.

Aunque puede existir mucha similitud entre varias curvas de brillo de distintos materiales cada una tiene características diferentes como pueden ser la posición de los picos TL de intensidad máxima, y la misma intensidad de los picos TL. Así también se encuentran diferencias entre el tiempo de desvanecimiento de cada pico TL (o del material TL mismo) debido a su sensibilidad termal a la influencia termal externa.

Una vez definida la forma de la curva de brillo TL, si el material se utilizara como un dosímetro personal entonces McKeever y colaboradores⁴ resume las características dosimétricas necesarias para que usar el material TL como dosímetro: Respuesta TL a la dosis absorbida, Sensibilidad TL y Respuesta TL a la energía.

La desea que la respuesta TL a la dosis absorbida por el material TL se lineal, McKeever y Chen⁴ señalan que la respuesta TL de muchos materiales dista de ser lineal y que puede presentar efectos no lineal variados, pero que esto depende del intervalo de dosis a trabajar así como el tipo de radiación a utilizar. A esto mismo señalan que a dosis "bajas" la mayoría de los materiales TL presentan una respuesta lineal, y definen el índice de supralinearidad $f(D)$ ó conocido como la función de respuesta a la dosis:

$f(D) = \frac{(S(D) - S_0)/D}{(S(D_1) - S_0)/D_1}$ donde S_0 es la intercepción, de la curva de respuesta TL al

extrapolarla, con las ordenadas en una grafica de intensidad TL contra dosis absorbida, y $S(D)$ y $S(D_1)$

son los valores de la intensidad TL en las dosis D y D_1 . En el caso ideal, es decir teniendo una respuesta lineal, $f(D) = 1$, y se dice supra lineal cuando $f(D) > 1$, que de acuerdo a McKeever y Chen⁴ es lo más comúnmente observada, mientras dicen que es sublineal si $f(D) < 1$, y se observa durante la aproximación a la saturación.

También señalan que más que una función la respuesta a la dosis es una funcional, es decir la respuesta a la dosis no es una constante en el tiempo pues el material TL sufrirá cambios por efectos externos (por ejemplo la oxidación) o por “agotamiento” por el uso mismo.

McKeever y Chen⁴ definen a la Sensibilidad TL relativa, $R(D)$, como una cualidad específica por cada material TL, que varía con la razón de la respuesta TL a una dosis absorbida D , $S(D)$, a la respuesta TL de un material de referencia (dosímetro previamente estudiado, o comercial) a la misma dosis, esto es $R(D) = \frac{S(D)_{materialTL}}{S(D)_{Referencia}}$. La dosis mínima absorbida es un parámetro relacionado a la sensibilidad

y es definida como dos desviaciones estándar de la intensidad TL de un dosímetro sin exponer.

Y por último la respuesta TL a la energía, McKeever y Chen⁴ la definen como la variación de la intensidad de salida detectada, para una dosis fija, como función de la energía de la radiación absorbida.

Pero muchos autores observado que al estudiar una característica dosimétrica como es la forma de la curva de brillo TL de un material TL es posible determina propiedades TL, tales como la naturaleza energética de las trampas involucradas, dado por la energía de activación E_t , la cual tiene una fuerte dependencia de la temperatura de estimulación de la termoluminiscencia. Y el tiempo promedio de permanencia de un electrón en un centro atrapante, dado por el factor pre exponencial, los cuales son conocidos como los parámetros cinéticos de curva TL.

La forma de conseguir esta información como se menciona es a través de la llamada curva de brillo termoluminiscente, la cual es obtenida después de someter el material TL en cuestión a un flujo de radiación ionizante de determinada energía, (Radiación beta, Rayos x, Radiación UV y otras), el cual excita los electrones de la banda de valencia hacia la banda de conducción para “inmediatamente” regresar a estados meta estables sobre el nivel de Fermi, posteriormente el material es calentado durante un tiempo específico, a una razón de temperatura por unidad de tiempo, para estimular la “fosforescencia” de los diferentes estados atrapantes que produce la curva de brillo, este es un proceso termalmente estimulado.

Esta curva puede presentar varios puntos de intensidad termoluminiscente máxima, provenientes de los diversos centros atrapantes que tienen el material estudiado. Hay diferentes métodos para estudiar picos de intensidad, ya sea único o varios juntos, de su estudio independiente se podrá determinar la energía y frecuencia del estado meta estable del cual provienen los electrones estimulados para producir la “fosforescencia”.

Por definición una propiedad es una característica de una cualidad, por lo que la termoluminiscencia como cualidad de un material puede ser caracterizada por la energía promedio de los estados atrapantes “ E_t ”, y por su factor pre exponencial “ s ” así como también el tiempo vida media a temperatura ambiente de el fenómeno TL.

ANTECEDENTES.

1. Conceptos Básicos de Luminiscencia.

La luminiscencia es el termino genérico empleado para describir la emisión de radiación electromagnética después de la absorción de energía, en forma de radiación. La luminiscencia producida por un sólido consiste en la emisión de radiación, por exceso de radiación térmica, en la región del UV al visible como consecuencia de una absorción previa de radiación.

Dependiendo de la fuente de excitación el proceso se designa como:

- a) Fotoluminiscencia; excitación por fotones.
- b) Cátodo luminiscencia; excitación por electrones energéticos.
- c) Electroluminiscencia; excitación por aplicación de voltaje.
- d) Triboluminiscencia; excitación por energía mecánica, específicamente trituración.
- e) Quimioluminiscencia; excitación por reacción química.

En esta clasificación no se incluye el fenómeno de termoluminiscencia, pues este fenómeno no es la excitación térmica de una emisión; si no más bien la estimulación térmica de una emisión proveniente de un centro o defecto que ha sido producido por otros medios.

El fenómeno luminiscente se ha clasificado de acuerdo con la duración de la emisión después de producirse la excitación. Cuando el tiempo de duración de la emisión es del orden de 10^{-8} sg o menor, se denomina fluorescencia. Cuando este tiempo es de segundos, o aun de horas, el fenómeno recibe el nombre de fosforescencia. Esta clasificación no es adecuada, por lo que se usa la dependencia con la temperatura T.

El espectro luminiscente siempre tiene longitud de onda mas larga que la radiación excitante, si se presenta fluorescencia y fosforescencia en el mismo material, la fosforescencia tendrá longitud de onda mas larga. Además la emisión luminiscente siempre envuelve transiciones ópticas entre los estados electrónicos característicos de la sustancia radiante. Los sistemas luminiscentes se dividen en tres categorías:

- I. Sistemas en los cuales la absorción y la emisión de la energía ocurren en el mismo centro;
- II. Sistemas en los cuales la absorción de energía ocurre en un centro y la emisión ocurre en otro, y
- III. Sistemas en los cuales el proceso anterior ocurre mediante el movimiento de portadores de carga.

TIPO I.

Sistemas en los cuales la absorción y la emisión de la energía ocurren en el mismo centro, la energía involucrada incluye contribuciones iónicas y electrónicas.

Para entender mejor los sistemas luminiscentes del tipo I se estudia el diagrama configuracional del centro luminiscente en el esquema de Von Hippel⁵, Fig.2. Las coordenadas configuracionales son la configuración de los iones alrededor del centro luminiscente, es decir describe la posición de los iones del sólido que se encuentran a menor distancia (primeros vecinos) respecto al centro luminiscente.

El esquema de Von Hippel explica:

Se tiene un centro luminiscente en la posición de equilibrio, el cual es excitado electrónicamente desde el estado base un estado excitado (A-B).

Posteriormente el centro luminiscente dentro el estado excitado se relaja liberando energía mediante vibración de la red para pasar a una posición de equilibrio dentro del estado excitado (B -C) .Aquí el centro luminiscente tiene dos posibilidades de de excitación ; la primera posibilidad es la emisión de luz y su posterior regreso al estado base en una posición de no equilibrio (C - D).En este punto el

centro luminiscente aun estando en estado base contiene un exceso de energía por lo que lo tiene que liberar en forma de luz para regresar a su posición de equilibrio (D - A).

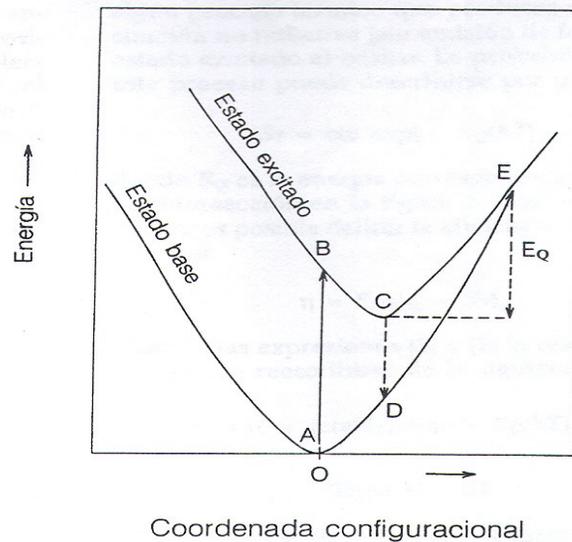


Fig.2 Esquema de VON HIPPEL

Ahora la fuerza que une iones con centros luminiscentes obedece la ley de Hooke. Donde el tiempo de excitación del centro luminiscente es mucho menor que el tiempo de cambio de posición del mismo, a esto se le conoce como principio de Frank-Condon. De acuerdo al esquema de Von Hippel se puede observar:

1. $\lambda_{emitida} \gg \lambda_{absorbida}$.
2. El decrecimiento de la eficiencia de la emisión del material luminiscente al aumentar la temperatura a la cual se realiza el proceso de emisión. Proceso que se conoce como destrucción térmica luminiscente (parte derecha del diagrama de Von Hippel).

En cada emisión de luz a la red cristalina, por el centro luminiscente siempre se observa un corrimiento de la frecuencia de la energía absorbida tanto en el estado excitado como en el estado base, a este corrimiento se le conoce como corrimiento de Stokes.

TIPO II y III.

Los sistemas que absorben la energía de excitación en un centro luminiscente y la emisión correspondiente que ocurre en otro centro diferente al absorbedor. Desde que se excitan los electrones, hasta que la energía es disipada (re radiada), la energía puede viajar dentro del material de un átomo o molécula a otro (transferencia de energía).

Los mecanismos básicos de transferencia de energía son:

- a) Fotoconductividad. La radiación ionizante crea pares libres electrón-hueco que viaja en el sólido y acarrea energía y carga.
- b) Reabsorción radiactiva. La transferencia de energía radiactiva produce efectos observables experimentalmente ya que depende del tamaño de la muestra y de la configuración del sistema experimental. En este tipo de proceso no reduce la vida media de la emisión fluorescente del átomo absorbente (A) en comparación con otros procesos.
- c) Transferencia no radiactiva. Es un proceso resonante mecánico cuántico basado en el intercambio de un fotón "virtual" mediante la interacción multipolo-multipolo entre el átomo absorbedor y emisor (E), o por interacción de intercambio.

La transferencia radiativa o no radiativa de energía depende del espectro de emisión de A traslape al espectro de absorción de E.

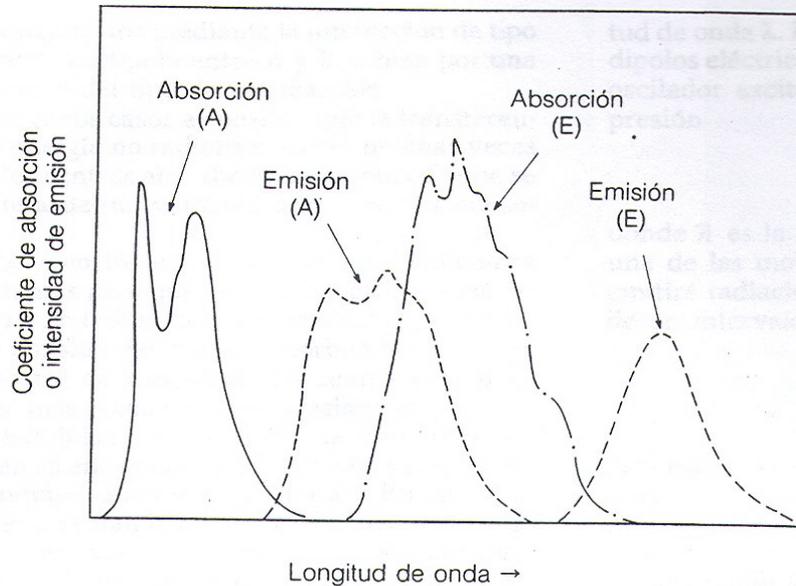


Fig. 3. Esquema de transferencia Radiactiva

Cuan mayor sea el traslape mayor es la probabilidad de la transferencia y su eficiencia aumenta (Fig.3).

El hecho de que la probabilidad de absorción de red del centro luminiscente emisor (E) es bastante pequeña, favorece la transferencia de energía no sea radiativa. Si los iones A y E están separados más de 3×10^{-10} m, la transferencia no se puede dar, aun cuando haya un traslape significativo.

MODELO SEMICLASICO DE LA TRANSFERENCIA ENERGÉTICA.

Considere 2 moléculas con momentos bipolares eléctricos p oscilando con frecuencia única ω y capaces de absorber o emitir radiación de longitud de onda λ .

Se asume que una de las moléculas es excitada, y después emitirá radiación con λ en tiempo

$$\tau_A = \frac{\hbar c^3}{M \omega^3}$$

Si la distancia entre las moléculas A y E es menor igual a 30×10^{-10} m, entonces la interacción entre sus campos dipolares permitirá que se transfiera energía entre A y E.

Se define a la distancia crítica R_0 ($\tau_T = \tau_A$) para que exista la transferencia de energía entre A y E y la energía potencial entre los dipolos como

$$U \approx \frac{M^2}{R^3}$$

Como resultado del acoplamiento se puede transferir la energía entre las moléculas en un tiempo $1/\omega$, esto es

$$\tau_T = \frac{1}{\omega} = \frac{\hbar}{U} = \frac{\hbar R^3}{M^2}$$

Aunque experimentalmente las líneas de absorción y de emisión tienen un ancho finito, pero no cero pues los centros A y E pueden oscilar en un intervalo de frecuencias. El ensanchamiento de las líneas se debe principalmente a la interacción entre el sistema electrónico y las vibraciones atómicas de la molécula.

Al tomar en cuenta que la probabilidad de que una molécula oscile en el intervalo de frecuencias Ω es $p = \left(\frac{\Omega'}{\Omega}\right) \left(\frac{U}{\hbar\Omega}\right)$ (Donde $\left(\frac{U}{\hbar\Omega}\right)$ es la probabilidad de transferir la energía a la frecuencia ω , y $\left(\frac{\Omega'}{\Omega}\right)$ es la probabilidad de que una de las moléculas resuene en el intervalo Ω') entonces

$$\tau_T \approx \tau_T \frac{\Omega^2 \hbar}{\Omega U} \approx \frac{\Omega^2 \hbar^2 R^6}{\Omega' p^4}$$

Cuando $\tau_E = \tau_T$, tenemos que $R = R_0$, entonces

$$R_0 \approx \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{\Omega'}{\tau_E \Omega^2}}$$

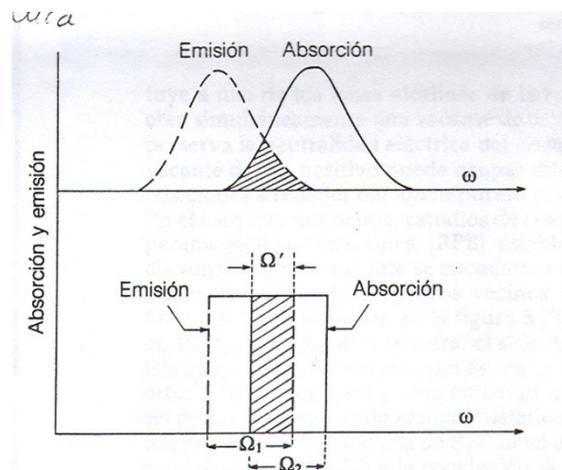


Fig. 4 Esquema de probabilidades de una transferencia energética semiclasica.

Se representa el proceso de absorción en un centro luminiscente y la emisión en un centro recombinatorio (este proceso puede darse en el mismo centro o en uno diferente) para cualificar la eficiencia en la transferencia de la energía.

2. TERMOLUMINISCENCIA (TL).

DEFINICION

El fenómeno de termoluminiscencia se define como la perturbación de un sistema electrónico de un aislante o semiconductor en equilibrio termodinámico por medio de la absorción de energía externa, producida por radiación ionizante, llevándolo a un estado meta estable. Seguido de su estimulación termal y relajación para regresar a la condición de equilibrio (Fig. 5).

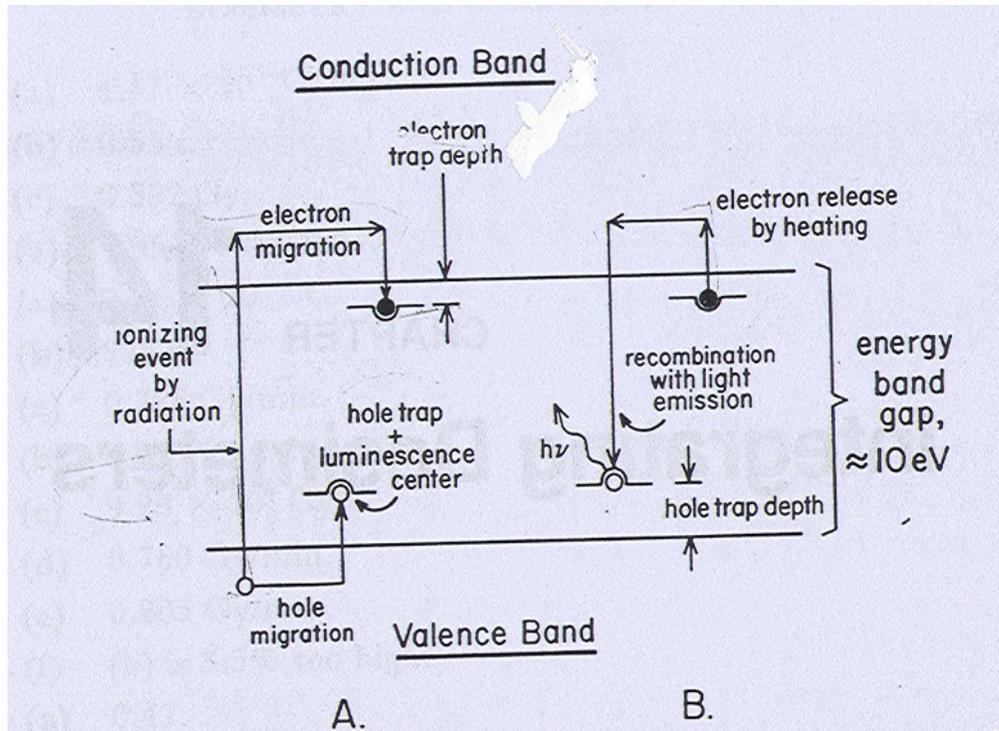


Fig. 5. Proceso microscópico de la Termoluminiscencia.

Macroscópicamente, la termoluminiscencia es una emisión de luz estimulada por el incremento de la temperatura de un cristal, después de remover la excitación (radiación ionizante).

DESCRIPCION FISICA DE LA TERMOLUMINISCENCIA COMO UN FENOMENO LUMINISCENTE TERMICAMENTE ESTIMULADO.

Un proceso luminiscente termalmente estimulado tiene una emisión de tipo fosforescente. Considere el caso de electrones atrapados en una energía E_t (debajo de la banda de conducción), aquí la energía de activación para la emisión fosforescente es $E = E_t$, previamente excitado el centro luminiscente.

Si se incrementara la temperatura a una razón $\beta = dT / dt$, entonces una temperatura puede ser alcanzada en la cual la probabilidad p (de emisión) es bastante alta para asegurar que el electrón es liberado y la emisión luminiscente es observada. Pero no como fosforescencia, la cual normalmente, aparece a una temperatura fija, por lo que esta emisión estimulada es una situación no isotérmica.

Así que como la temperatura continua incrementándose, la intensidad de la emisión luminiscente se incrementa hasta un momento en que la población de electrones atrapados en el estado meta estable es

agotada en tal punto la intensidad de la emisión luminiscente disminuye con un incremento mayor de la temperatura. El resultado es el pico característico de la curva intensidad en la curva luminiscente contra la temperatura, donde la temperatura en el máximo del pico esta relacionada con la profundidad de la trampa E_t , el factor s y la tasa de calentamiento β .

Esto es la descripción de un proceso térmicamente estimulado (TPS). Cuando la radiación excitante es radiación ionizante se le llama TERMOLUMINISCENCIA (TL).

Otra forma de TSP es la conductividad termalmente estimulada (TSC), después de la excitación con radiación ionizante, la relajación termal regresa al equilibrio por monitoreo de las cargas libres durante su paso a través de estados excitados de localizados (es decir, en la banda de conducción para electrones y banda de valencia para agujeros) y otras.

Los procesos anteriores pueden ser descritos también en términos de la perturbación del equilibrio del nivel de Fermín en el material bajo estudio. A 0°K y en equilibrio termodinámico, de la estadística de FD se espera que los estados sobre E_F estén vacíos y los que estén debajo se encuentran llenos, presentándose una función de llenado F_0 .

Después de la perturbación una nueva función de llenado $F_n(E)$ muestra una distribución de electrones atrapados en estados localizados en la banda prohibida sobre E_F e igual concentración de agujeros atrapados debajo de E_F . Aquí se puede definir 2 cuasi niveles de Fermi, uno para electrones E_{Fn} y uno para agujeros E_{Fp} .

Durante la relajación termalmente estimulada, esto es durante el calentamiento, la función de llenado $F_n(E)$ gradualmente regresa a su estado de pre-perturbación, aunque con una temperatura más alta. Mientras los cuasi niveles de Fermi gradualmente regresan al nivel de Fermi conforme la concentración de cargas atrapadas decae regresando a sus valores de equilibrio. En esta etapa el calentamiento sigue una función del tipo $T(t) = T_0 + \beta t$, donde $T_0 = T(0^\circ \text{K})$ y $\beta = \Delta T/\Delta t$.

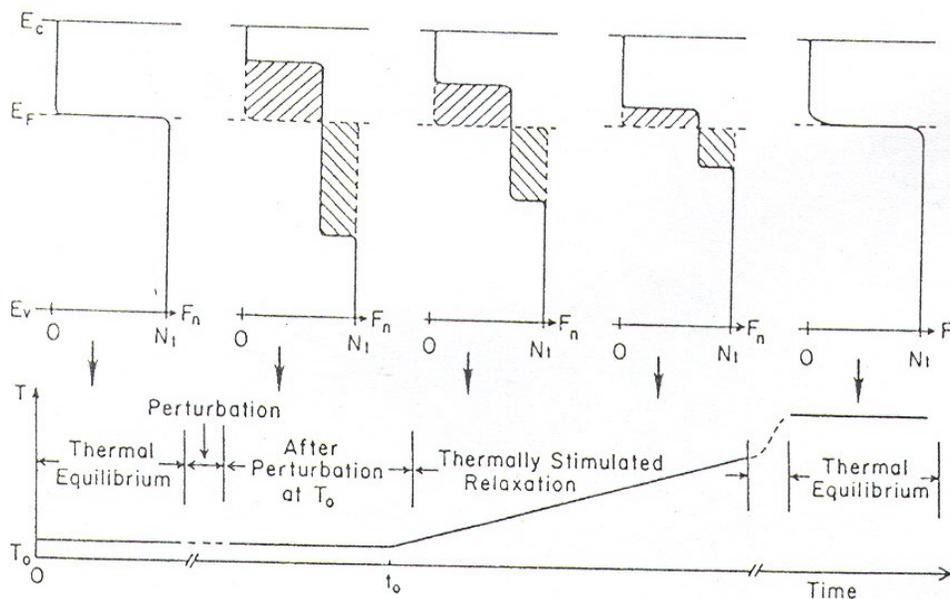


Fig. 6. Se observa el comportamiento del nivel de Fermi conforme se aumenta la temperatura linealmente y su posterior regreso al equilibrio termal, pero a temperatura mas alta.

Las suposiciones para la descripción del fenómeno TL son:

1. No se incluyen transiciones directas todas pasan a través de bandas de localizadas.
2. Se definen a los estados atrapantes como en los cuales la probabilidad de excitación termal desde el nivel dentro de la respectiva banda de localizadas es mas grande que la probabilidad de recombinación de que la carga quede atrapada con una carga libre de signo opuesto. también se define un centro recombinatorio como un centro en el cual la probabilidad de recombinación con una carga de signo opuesto es mas grande que la de excitación termal del portador atrapado. Se define también una demarcación de nivel de energía en el cual las probabilidades anteriores son iguales. Por lo que se tiene un nivel de demarcación para electrones E_{Dn} y otro para agujeros E_{Dp} .
3. Las transiciones de electrones desde la banda de conducción a través de las trampas de electrones de energía E , para las cuales $E_c > E > E_{Dn}$, son no radiactivas, emitiendo fonones. Similarmente, la transición de agujeros desde $E \leq E_v$ a trampas de agujeros donde $E_{Dp} > E > E_v$ son también no radiactivas.
4. Las transiciones de electrones libres desde $E \geq E_c$ a sitios de recombinación donde $E_F > E > E_{Dp}$ o agujeros libres desde $E \leq E_v$ a centros de recombinación en $E_{Dn} > E > E_F$ son radiactivas, emitiendo fotones.
5. Una vez que una trampa esta vacía, los portadores liberados y las trampas son indistinguibles entre ellas.
6. Únicamente electrones atrapados son termalmente liberados durante la estimulación termal, lo que significa que la emisión TL es estimulada por la liberación de electrones atrapados. así que se puede tomar que $n_v = 0$, por lo que la concentración de agujeros en la banda de valencia es cero así que los agujeros fueron termalmente inestables portadores de carga.
7. La mas importante de las suposiciones es la del cuasi equilibrio (QE, siglas en ingles)

$$\left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dn}{dt} \right|, \left| \frac{dm}{dt} \right|$$

Donde $n_c + n = m$, donde n es la concentración de electrones atrapados, m es la concentración de estados disponibles para recombinación en los estados meta estables y n_c es la concentración de electrones libres en la banda de conducción. Se exige que la concentración de electrón libre en la banda de conducción n_c es cuasi estacionaria, con lo que la concentración de inicial de portadores es pequeña, es decir $n_{c0} \approx 0$, esto es que la carga libre nunca se acumula en la banda de conducción durante la estimulación termal.

Así que $n \cong m$ y por tanto

$$I_{TL} = -\eta \frac{dm}{dt} \cong -\frac{dn}{dt} \quad (1)$$

Si todas recombinaciones producen fotones y todos los fotones son detectados entonces $\eta=1$.

Y Tomando

$$-\frac{dm}{dt} = A_m m n_c \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -sn \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} + n_c (N - n)A \quad (3)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dn}{dt} + \frac{dn_c}{dt} \quad (4)$$

Así que se tiene

$$I_{TL} = \frac{1}{\left[\frac{(N - n)\sigma_n}{m\sigma_{mn}} + 1\right]} ns \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\}$$

o

$$I_{TL} = ns \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} \left[1 - \frac{(N - n)\sigma_n}{(N - n)\sigma_n + m\sigma_{mn}}\right] \quad (5)$$

Se le conoce como intensidad TL general para una única trampa (GOT, siglas en ingles) y donde el termino

$$1 - \frac{(N - n)\sigma_n}{(N - n)\sigma_n + m\sigma_{mn}} \quad (6)$$

Corresponde a la probabilidad total de que se presente una recombinación desde el estado excitado al estado base previa una estimulación termal (sin reatrapamiento) que es uno menos la probabilidad de presentarse una recombinación a un estado meta estable en un reatrapamiento y luego el paso al estado base.

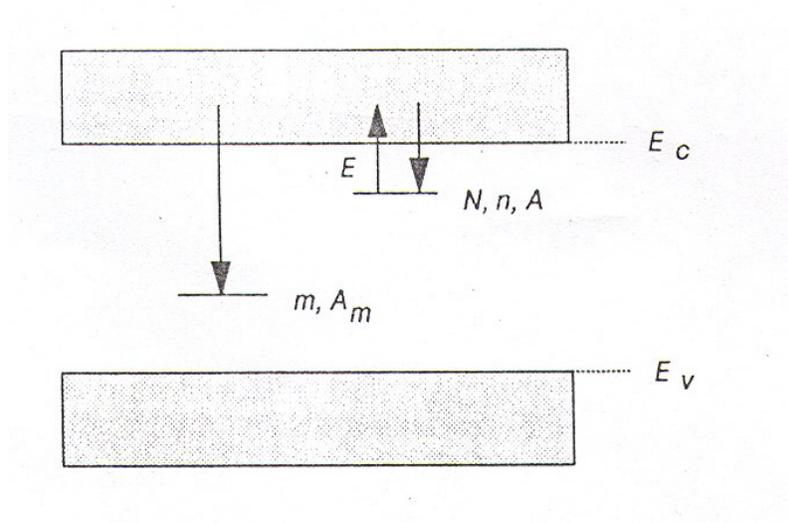


Fig. 7 se observa posteriormente a la excitación del material la concentración de electrones atrapados en estado meta estable n con probabilidad A . Después del calentamiento a una razón lineal se ven los posibles la concentración de estados metaestables de recombinación m , con probabilidad A_m .

Como primera aproximación (**Primer orden cinético de la emisión TL**) Randall y Wilkins, asumieron un reatrapamiento despreciable (reatrapamiento bajo) durante el tiempo de estimulación termal, por lo que $(N - n)\sigma_n \ll m\sigma_{mn}$ así que, tomando además que $-\frac{dn}{dt} \propto n$, integrándolo desde 0 a t y usando una rapidez de calentamiento constante β se obtiene

$$I_{TL} = n_0 \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} \exp\left\{-\left(\frac{s}{\beta}\right) \int_{T_0}^T \exp\left\{-\frac{E_t}{k\theta}\right\} d\theta\right\} \quad (7)$$

Que es conocida como la ecuación de Randall y Wilkins para la intensidad TL a primer orden.

Las propiedades de esta expresión pueden ser deducidas de la observación de la siguientes graficas (Fig. 7).

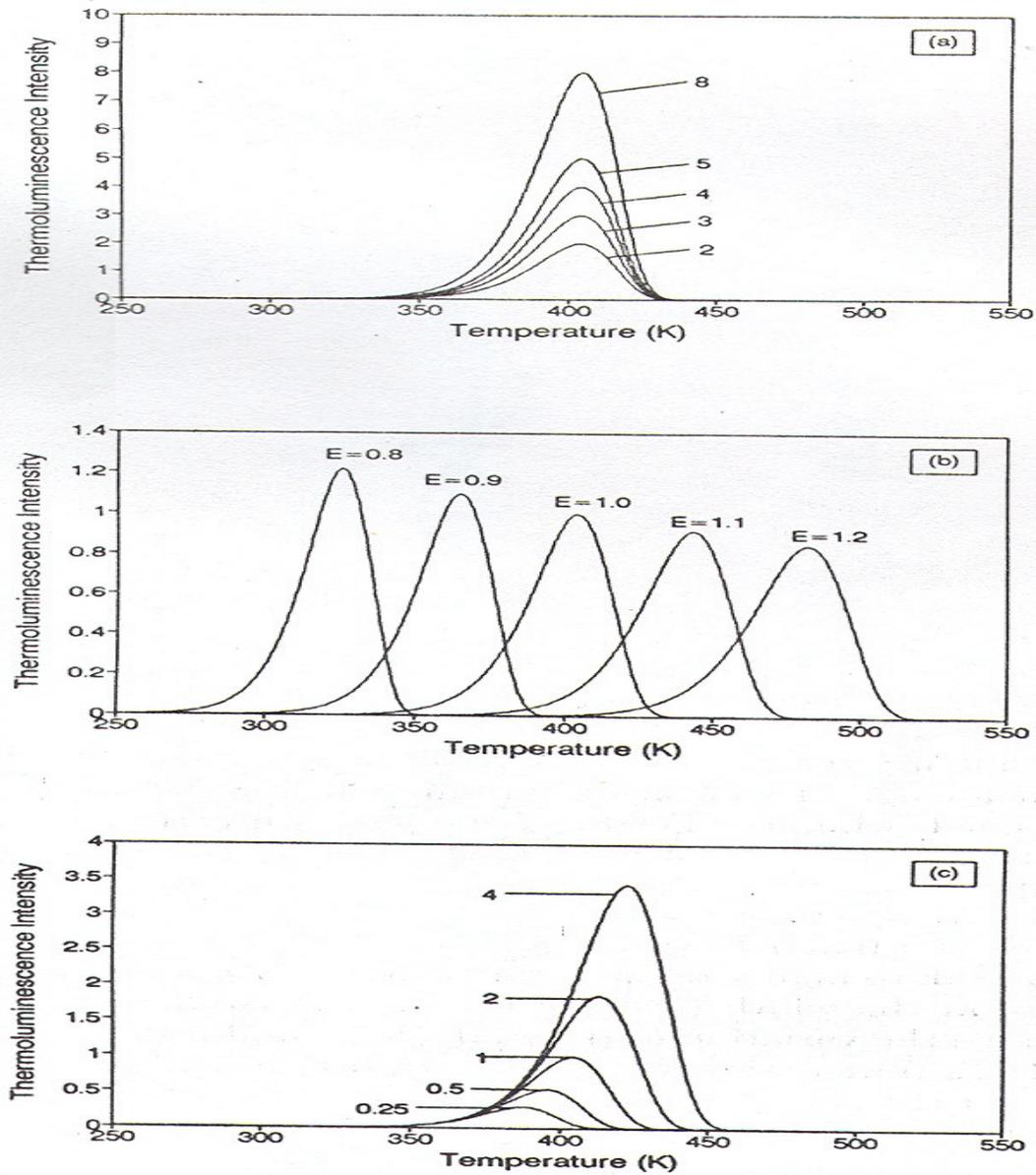


Fig. 8. Propiedades de la ecuación de Primer Orden Cinético de Randall- Wilkins. a) $\beta = dT / dt = \text{CTE}$, n_0 creciente, b) $\beta = dT / dt = \text{CTE}$, E_i creciente y c) β aumentando, n_0 creciente.

concentración de electrones recombinados que se ve de la curva, además la profundidad aparente de las trampas crece.

Para el inciso (b) la profundidad de la trampa crece progresivamente, manteniendo β ; se observa que la posición del máximo de la curva TL se mueve hacia temperaturas mayores, pues cada trampa se estimula a una temperatura diferente pero la intensidad disminuye aunque su área bajo la curva parece mantenerse constante lo que indica que la concentración de electrones recombinación es constante e igual a n_0 .

Para el inciso (c) se observa que la curva mantiene la temperatura mínima para la intensidad TL ($I = 0$) pero la posición del máximo de la curva TL se corre hacia temperaturas mayores, aumentando de manera progresiva la intensidad TL y su área bajo la curva lo que indica que la concentración electrones recombinados es mayor ya que la razón de calentamiento β se aumento, aunque n_0 sea constante. Además se puede ver que la profundidad de las trampas aumenta.

CONSIDERANDO EL REATRAPAMIENTO.

Ahora cuando el reatrapamiento deja de ser despreciable (se dice alto reatrapamiento) entonces $(N - n)\sigma_n \gg m\sigma_{mn}$, con $N \gg n$ y $n = m$, se tiene

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = s \left(\frac{\sigma_n}{N\sigma_{mn}} \right) n^2 \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\},$$

pero

$$\frac{dn}{dt} \propto n^2$$

Por lo que

$$I_{TL} = \left(\frac{n_0^2}{N} \right) s \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} \left[1 + \left(\frac{n_0 s}{\beta N} \right) \int_{T_0}^T \exp\left\{\frac{E_t}{k\theta}\right\} d\theta \right]^{-2} \quad (8)$$

Esta es conocida como la ecuación de Garlick y Gibson para la intensidad TL para segundo orden cinético.

Las propiedades de esta expresión pueden ser deducidas de las siguientes graficas (Fig. 9).

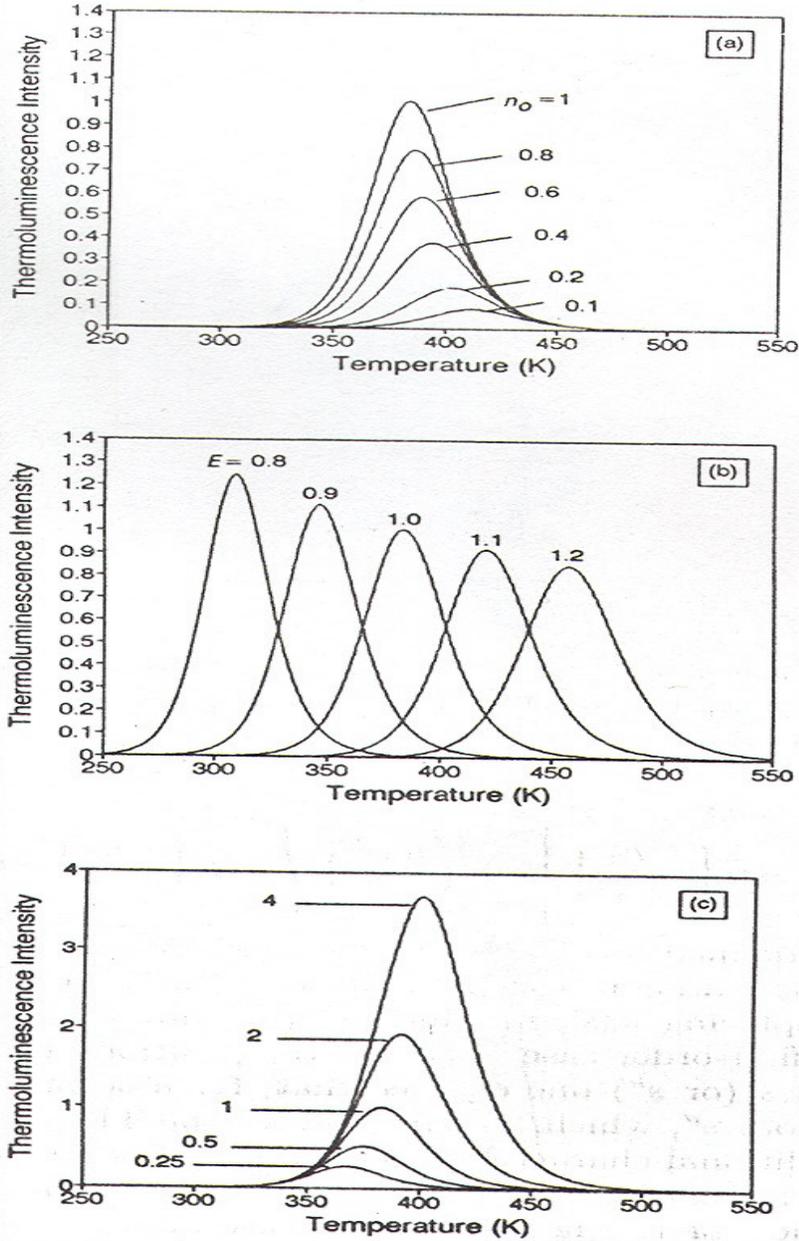


Fig. 9. Propiedades de la ecuación de segundo orden cinético de Garlick y Gibson. a) $\beta = \text{CTE}$, n_0 disminuye, b) $\beta = \text{CTE}$, E_t creciente y c) β creciente, $n_0 = \text{CTE}$.

Del esquema para la ecuación de Garlick y Gibson de segundo orden cinético (fig. 9) para la intensidad de emisión TL contra la temperatura se deduce lo siguiente:

Para el inciso(a) se disminuye la concentración inicial de electrones atrapados manteniendo la razón de calentamiento β constante. Se ve que la posición del máximo de la intensidad de la emisión TL se corre a la izquierda hacia temperaturas menores conforme n_0 aumenta, además se ve que la intensidad de la emisión TL disminuye conforme n_0 disminuye, lo que indica que la concentración de electrones recombinados disminuye y la profundidad de las trampas también.

Para el inciso (b) se mantiene n_0 y β constantes, cambiando la profundidad de la trampa. Se aumenta la profundidad de la trampa observándose que la posición del máximo de la emisión TL se corre a la derecha a temperaturas mayores, lo que indica que cada trampa se estimula a diferente temperatura,

pero la intensidad de la emisión TL disminuye conforme la profundidad de las trampas aumenta, aunque manteniendo el área aparente bajo la curva, lo que indica que la concentración de electrones recombinados es constante e igual a n_0 . Además se ve una mayor simetría en la forma de las graficas.

Y por ultimo para el inciso (c) se mantiene n_0 constante, pero se aumenta β . Se observa que el mínimo de emisión TL se mantiene constante conforme se aumenta β , pero la posición del máximo de emisión TL se corre a la derecha a mayores temperaturas, aumentando la intensidad de la emisión TL, lo que indica que la concentración de electrones recombinados crece conforme la intensidad aumenta. Además se ve que la profundidad de las trampas crece con forme aumenta β .

Las formas de las ecuaciones de Randall-Wilkins y Garlick-Gibson han sido derivadas con el uso de suposiciones específicas concernientes a las probabilidades de recombinación y atrapamiento. May y Partridge (1964) escribieron una expresión empírica de orden cinético general para la emisión TL:

$$I_{TL} = n^b s' \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\}$$

Donde s' tiene dimensiones de $m^{3(b-1)}s^{-1}$ y b esta definido como el parámetro de orden general y no necesariamente 1 o 2. Rasheedy (1993) propuso

$$I_{TL} = -\frac{dn}{dt} = \left(\frac{n^b}{N^{b-1}}\right) s \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\}$$

La cual se reduce a la forma de las ecuaciones de primer y segundo orden cinético con $b = 1$ y $b = 2$. Así

$$I_{TL} = n_0^b s \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} N^{(1-b)} \left[1 + \frac{s(b-1) \left(\frac{n_0}{N}\right)^{(b-1)}}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left\{-\frac{E_t}{k\theta}\right\} d\theta \right]^{\frac{b}{b-1}} \quad (9)$$

MODELO DE CURVA DE BRILLO TL.

ESPECTRO DE EMISIÓN TERMOLUMINISCENTE.

El fenómeno de termoluminiscencia en un material puede ser descrito experimentalmente como sigue: Una muestra sólida es excitada, por radiación ionizante a una cierta temperatura baja. Esta irradiación puede tomar lugar en un laboratorio o cuando se usa la muestra en alguna aplicación, entonces la muestra se encuentra sumergida un medio ambiente radiactivo, durante un tiempo determinado, mientras el material TL es excitado. Al final de esta etapa, la muestra es introducida a un horno adecuado y la muestra es calentada. La siguiente etapa después del calentamiento es llamada etapa de lectura de salida ó “readout”. La temperatura en el horno es incrementada a una razón de calentamiento constante, y la emisión de luz como una función de temperatura (o tiempo) es grabada usando un detector sensible a la luz tal como un fotomultiplicador. Esta luz emitida como una función de la temperatura predice la llamada *curva de brillo* termoluminiscente. La forma de la curva de brillo puede presentar un o más picos de luz emitida, algunos de los cuales pueden estar traslapados. La forma de la curva de brillo puede depender de la respuesta espectral del fotomultiplicador, de la naturaleza de la excitación inicial (irradiación con UV, α , β , γ), de la dosis de excitación u otros factores.

La termoluminiscencia es usualmente observada en cristales, aunque el fenómeno también puede presentarse en materiales desordenados.

En principio, un cristal perfecto sin impurezas o defectos se espera no exhiba termoluminiscencia. Por supuesto tal cristal perfecto no existe del todo. Así que la asociación de imperfecciones específicas con cierto pico TL es a menudo bastante delicado. Ya que puede suceder que una cierta impureza o defecto sea abundante (dígase ~ 1%), pero no contribuir a la señal TL medida. Pero suceder que otras imperfecciones indetectables por su baja concentración sean las responsables de la señal TL medida, por tanto se puede decir que la TL es una herramienta muy sensible a detectar imperfecciones en pequeñas cantidades, pero no hay una forma sencilla de identificarlas a ellas mismas.

Para aplicaciones, tales como dosimetría, esta inhabilidad para identificar las imperfecciones importantes no es importante; Si el efecto es reproducible (reproducir el material), lo únicamente importante es que tenga una calibración confiable. Desde el punto de vista físico un mayor entendimiento del rol de los defectos y las impurezas es de gran importancia, y así indirectamente estas pueden influenciar las consideraciones de elegir el apropiado material dosimétrico.

Así que para explicar la aparición de un solo pico TL, se asume la existencia de al menos dos tipos de imperfecciones en el cristal. Durante la excitación inicial, una de esas imperfecciones atrapa electrones y otra captura hoyos; los electrones y los hoyos son producidos en parejas por la radiación aplicada. Las energías de esos conductores capturados están relacionados a estados atrapantes asociados con las imperfecciones, y las energías están dentro de la banda prohibida del cristal dado. Esos estados son meta estables, y a bajas temperaturas de excitación, sus tiempos de vida son muy grandes. El electrón en estados atrapantes se considera están mas cerca de la banda de conducción, y los hoyos en estados atrapantes están mas lejos de la banda de valencia. En este modelo, mientras la muestra es calentada, los electrones son liberados térmicamente, usualmente a la banda de conducción, y entonces ellos pueden recombinarse con hoyos atrapantes, así emitiendo fotones. En esta situación, los hoyos en estados atrapantes son llamados centros luminiscentes ó centros recombinatorios los cuales están cerca de la banda de valencia y los electrones en estados atrapantes se nombrados como trampas están lejos de la banda de valencia.

La intensidad de la emisión resultante es entonces mostrada en una curva como función de la temperatura. De esta forma se muestran como las diferentes trampas activas muestran picos dispersos en la grafica. Así mientras la resolución en la temperatura puede separar los diferentes procesos sin atrapamiento que sucede en el material, mientras medidas contra la longitud de onda puede distinguir los diferentes procesos de recombinación los cuales se están presentando. Las ecuaciones que muestran el comportamiento del fenómeno habla simplemente acerca de la recombinación neta a cualquier temperatura fija, sin discutir la posibilidad de algunos otros sitios de recombinación existentes en el material.

Para el caso de un solo electrón atrapado, con concentración n de electrones atrapados y dos centros de recombinación con m_1 y m_2 concentraciones y probabilidades de recombinación A_{mn1} y A_{mn2} , así que $n = m_1 + m_2$. Remplazando $m A_m$ con $m_1 A_{mn1} + m_2 A_{mn2}$, así que la GOT cambia

$$I_{TL} = \frac{ns \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} (m_1 \sigma_{mn_1} + m_2 \sigma_{mn_2})}{[(N - n)\sigma_n + (m_1 \sigma_{mn_1} + m_2 \sigma_{mn_2})]} \quad (10)$$

Haciendo $(m_1 \sigma_{mn_1} + m_2 \sigma_{mn_2}) \gg (N - n)\sigma_n$, que implica que el reatrapamiento es despreciable (aproximación de Randall y Wilkins) se tiene la expresión para primer orden cinético. Ahora cuando $(m_1 \sigma_{mn_1} + m_2 \sigma_{mn_2}) \ll (N - n)\sigma_n$ implica que el reatrapamiento deja ser despreciable (aproximación de

Garlick y Gibson) y haciendo $N \gg n$, implica que la concentración de electrones no atrapados es mucho mayor que la de electrones atrapados, se tiene

$$I_{TL} = \frac{s \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} (nm_1\sigma_{mn_1} + nm_2\sigma_{mn_2})}{N\sigma_n} \quad (11)$$

Esa ecuación no contiene los términos m o A_{mn} y así la posición de los picos y su forma pueden ser independientes del número de recombinación del proceso presente.

Si $m_1\sigma_{mn_1} > m_2\sigma_{mn_2}$ entonces el centro de recombinación #1 (emitiendo luz en λ_1) captura electrones mas eficientemente que el centro #2 (emitiendo en λ_2). Así pues la longitud de onda de la emisión TL puede cambiar conforme las trampas se vacían. Por lo que se podría esperar que λ_1 pueda aparecer a una temperatura menor que la emisión TL en λ_2 .

Por tanto si se tiene un detector que responde eficientemente para fotones con λ_1 y λ_2 , entonces una distorsión puede ser introducida es decir el pico de brillo será distorsionado, apareciendo como un pico angosto y corrido. Aunque observaciones experimentales de este tipo no son frecuentes. Un ejemplo es dado por Bonjglioli et al (1958) y otro por Hornyak et al (1992). Ellos observaron emisiones en el “verde” y “UV” desde un pico TL en cuarzo natural. Ellos interpretan el resultado en base a un modelo con una trampa y dos centros recombinatorios y una distribución de estados atrapantes, y se interpreta como una emisión múltiple en λ . Si el proceso de emisión múltiple, la recombinación conduce a la excitación de un ion impuro, se puede ver la emisión múltiple debido a la de-excitación de la impureza desde varios estados excitados, esto es, se puede tener una reabsorción de la emisión inicial por otra impureza conduciendo a una excitación de una segunda impureza, una emisión múltiple en λ .

La única forma de distinguir si se presenta tal situación es estudiar el espectro de emisión TL como una función de la temperatura. Así que datos de I_{TL} contra λ contra T muestran si el espectro de emisión esta variando para todos los picos TL, o si es constante. (Fig. 10).

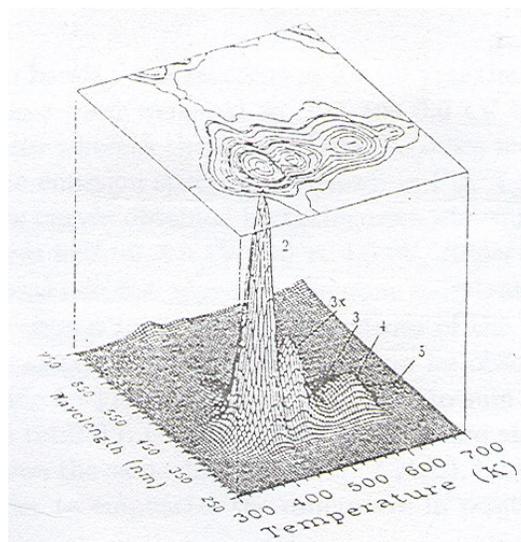


Fig.10. Intensidad TL vs. λ Vs. T. Para el $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ irradiado con rayos X.

3. LA CINÉTICA DE LA CURVA TL

Todos los modelos para TL involucran un número de parámetros los cuales son tiene una relación física con los estados atrapantes responsables de la emisión TL

En el modelo de primer orden de Randall-Wilkins descrita por la ecuación (7) en la cual hay tres parámetros físicos a evaluar son: la energía de activación E_t (en eV), el factor de frecuencia s (s^{-1}) y la concentración de electrones atrapados inicialmente n_0 (m^{-3}), los cuales se consideran los parámetros cinéticos de un pico de la curva de brillo TL.

Existe otra constante importante η la cual conecta la intensidad TL $I(t)$ con la razón de cambio de los conductores atrapados $-dn/dt$. Por lo que la constante puede depender de la longitud de onda del espectro de emisión. Así que manteniendo constante a η con unidades definidas de un conjunto arbitrario intensidades y manteniendo las características de la curva de brillo, por tanto la información acerca de los otros parámetros puede aun ser extraída.

En el caso de un solo pico de primer orden, el rol de la concentración inicial de conductores de carga atrapados no es mas que una constante multiplicativa por lo que puede ser evaluada con η , mientras el resto de la expresión , contiene dos constantes físicas mas básicas E_t y s que pueden ser evaluadas de la forma del pico o por otros métodos como se vera adelante.

Si η es conocida, el valor de n_0 , puede ser encontrado como el área total bajo el pico TL de la curva TL, para el caso de primer orden cinético, donde n_0 es una constante.

En un modelo mas realista existen 8 parámetros independientes: A_m , A , E_t , s , n_0 , n_{c0} , m_0 y N que determinan la forma del pico en la curva de brillo, por lo que resolver el conjunto de ecuaciones 1-4, solo se realiza numéricamente; pero extraer los 8 parámetros de una única o varias indistinguibles curvas experimentales es incluso mas problemático.

Así pues manteniendo en mente esta dificultad, se puede atacar el problema de la evaluación de los 8 parámetros de diferentes formas.

En el caso de un simple primer orden cinético establecido, es relativamente fácil calcular los parámetros E_t y s . En un caso mas general se puede diferenciar entre parámetros “importantes” que tienen una mas fuerte influencia sobre la forma de la curva (por ejemplo E_t y s), que pueden ser mas fáciles de encontrar del pico experimental y los “menos importantes”, como puede ser el hecho de que n_{c0} es casi cero a temperaturas relativamente bajas (dígase temperatura ambiente) en aislantes; Así para evaluar un cierto parámetro, se busca una característica en las medidas resultantes que es mas sensible a este parámetro y menos sensible a los restantes. Por ejemplo la parte de la elevación inicial del pico, donde el análisis de esta región predice la energía de activación independientemente de los otros parámetros.

Bajo estas consideraciones e incluyendo una serie de medidas monitoreando los picos , en diferentes intervalos del espectro de emisión, o después de irradiar en varias temperaturas iniciales, o para diferentes dosis para un análisis TL, conjuntado con métodos de análisis de procesos termalmente estimulados o alguno para fenómenos relacionados (como la fosforescencia) se puede reducir considerablemente el trabajo.

En ciertos casos se acepta en realidad que algunos parámetros son supuestos, por lo que para un pico descrito con siete parámetros relevantes en un modelo solo se incluyen tres. Siendo esta la situación usual cuando se evalúan los parámetros E_t , s y b en un pico de orden general.

Este modelo simplificado puede servir para la caracterización del un pico de la curva de brillo y ayuda a la estimación de la estabilidad del mismo pico a diferentes temperaturas ambientes.

ADEMAS ESTE PUNTO ES DE GRAN IMPORTANCIA EN APLICACIONES DE DOSIMETRIA DE RADIACIONES O EN EL DATADO.

Por definición la fosforescencia es el decaimiento de la luminiscencia termalmente estimulada como una función del tiempo a una temperatura constante, así que en esencia la fosforescencia puede ser considerada como termoluminiscencia, o mas bien como luminiscencia termalmente estimulada a temperatura constante, la cual se asocia con el atrapamiento de conductores en trampas poco profundas y su subsiguiente expulsión termal y su finalmente recombinación radiactiva. Una definición de trampas profundas se puede dar cuando la temperatura de la muestra esta contenida en nitrógeno liquido y esta se encuentra a esa temperatura (LNT), entonces una trampa poco profunda puede ser una trampa electrónica de 0.1 a 0.2 eV debajo de la banda de conducción, aunque no es la única definición para una trampa poco profunda.

Si la temperatura ambiente es la temperatura del cuarto de trabajo es decir ~ 300 K, entonces la profundidad de las trampas importantes medidas fosforescentemente (entiéndase que la fosforescencia se diferencia de la fluorescencia en que la primera tiene una dependencia con la temperatura y es un fenómeno de largo tiempo medido en segundo, minutos ú horas, mientras el otro no depende del tiempo y es muy corta duración) serán substancialmente mayores a 0.4 – 0.5 eV (a temperatura ambiente la emisión de trampas mas profundas es tan pequeña que no es medible por el detector, y para trampas muy poco profundas el tiempo de recombinación es tan corto que el detector le es difícil medirlo).

Aunque el decaimiento fosforescente no es el mejor método para evaluar los parámetros cinéticos es un buen método aproximado.

4. MODELO DE MCKEEVER PARA UN DOSÍMETRO.

DEFINICION DE DOSIMETRIA.

La dosimetría de radiación (ó dosimetría) se encarga de la medición de la dosis absorbida ó de la razón de dosis emergente de la interacción de la radiación ionizante con la materia. La premisa básica para el uso de un dosímetro en TL es que la intensidad TL puede ser relacionada a la dosis de radiación absorbida. En un sistema ideal, la intensidad TL es directamente proporcional a la dosis absorbida dentro de un amplio rango de dosis. Como resultado la respuesta a la dosis puede ser calibrada, y una dosis desconocida puede ser determinada por simplemente medir la intensidad TL resultado de la exposición y comparación con la señal calibrada.

El uso de la TL en la dosimetría se la llama dosimetría termoluminiscente (TLD).

APLICACIONES DOSIMETRICAS.

Las aplicaciones dosimétricas se pueden dividir en dos categorías en general: la dosimetría personal y la dosimetría ambiental.

El objetivo de la dosimetría personal es monitorear la dosis de radiación a la que esta expuesto una persona durante su rutina ocupacional, dentro de esta categoría se puede considerar la dosimetría médica. Además del monitoreo también se incluye la determinación de la dosis absorbida causada por exposición accidental a la radiación. La dosimetría personal cubre: La dosimetría en Extremidades, la dosimetría de cuerpo entero y la dosis sobre tejido (esto es dosis sobre la piel).

PROPIEDADES GENERALES DE UN DOSIMETRO TL (MODELO DE McKeever).

Respuesta a la dosis: Se desea que la respuesta a la dosis absorbida sea lineal, aunque muchos materiales TL no tiene este tipo de respuesta. Pero en dosis suficientemente bajas los materiales TL mas conocidos muestran una respuesta prácticamente lineal con cierta sensibilidad. Se define la función de la respuesta a la dosis como una medida de la respuesta de la dosis absorbida de un material TL mediante

$$f(D) = \frac{(S(D) - S_0)/D}{(S(D_i) - S_0)/D_i} \quad (12)$$

Donde S_0 es la intercepción, de la curva de respuesta TL al extrapolarla, con las ordenadas en una grafica de intensidad TL contra dosis absorbida, y $S(D)$ y $S(D_i)$ son los valores de la intensidad TL en las dosis D y D_i . En el caso ideal, es decir teniendo una respuesta lineal, $f(D) = 1$, y se dice supra lineal cuando $f(D) > 1$, que de acuerdo a McKeever y Chen⁴ es comúnmente observada, mientras dicen que es sublineal si $f(D) < 1$, y es la mas a menudo observada durante la aproximación a la saturación. Fig. 11.

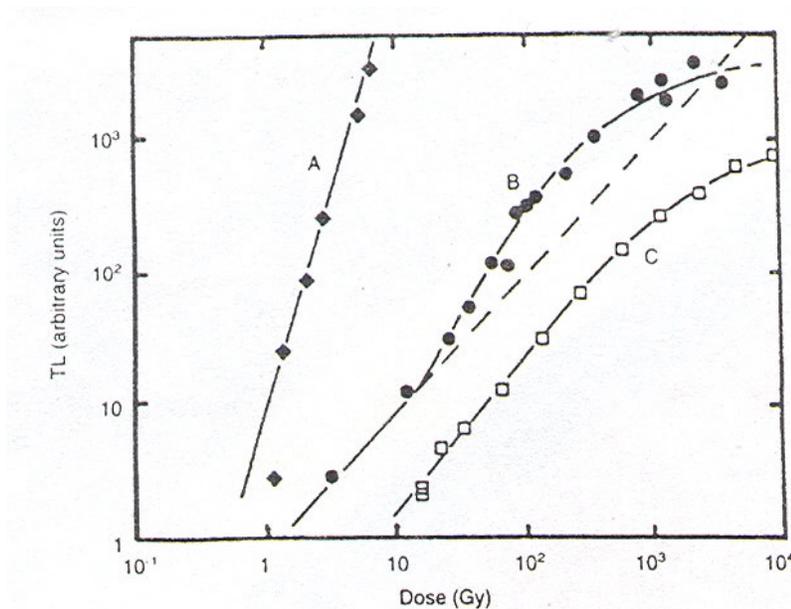


Fig. 11. Ejemplos de respuesta de la dosis para 3 materiales TL. A. Pico a 110 °C en el cuarzo. B. Pico 5 del TLD-100. C. El pico principal del CaF₂: Mn.

En la figura 11 el pico A. Presenta una función de respuesta a la dosis absorbida y se encuentra que es altamente supra lineal $f(D) > 2$, mientras el pico del CaF₂: Mn presenta una respuesta casi lineal ($f(D) = 1$). Y el pico del LiF: Mg, Ti muestra un crecimiento lineal-supra lineal-sublineal.

La mayoría de los materiales presenta una saturación a dosis cercanas a 10^2 - 10^3 Gy.

También señalan que más que una función la respuesta a la dosis es una funcional, es decir la respuesta a la dosis no es una constante en el tiempo pues el material TL sufrirá cambios por efectos

externos (por ejemplo la oxidación) o por “agotamiento” por el uso mismo. La importancia de la observación de $f(D)$ depende de la transferencia lineal de energía (LET) o de la densidad de ionización del campo de radiación. Así cuando se presenta supralinealidad en un conjunto de dosis se observa que esta también tiene una dependencia respecto al LET.

Sensibilidad: McKeever y Chen⁴ definen a la Sensibilidad TL relativa, $R(D)$, como una cualidad específica por cada material TL, que varía con la razón de la respuesta TL a una dosis absorbida D , $S(D)$, a la respuesta TL de un material de referencia (dosímetro previamente estudiado, o comercial) a

$$\text{la misma dosis, esto es } R(D) = \frac{S(D)_{\text{material TL}}}{S(D)_{\text{Referencia}}} . \quad (13)$$

La dosis mínima absorbida es un parámetro relacionado a la sensibilidad y es definida como dos desviaciones estándar de la intensidad TL de un dosímetro sin exponer.

Ahora dado que $S(D)$ presenta una dependencia respecto de LET entonces $R(D)$ presentara esa misma dependencia. Además muchos materiales muestran también una fuerte dependencia respecto de la sensibilidad sobre la razón de calentamiento, β .

Se observa también que muchos materiales usados en TLD tiene una pobre sensibilidad en la etapa de crecimiento del material, por lo que han sido sensibilizados por varios tratamientos de recocido y/o tratamiento de pre-exposición.

Respuesta TL a la Energía: McKeever y Chen⁴ definen la respuesta a la energía como la variación de la intensidad de salida detectada, para una dosis fija, como función de la energía de la radiación absorbida. Esta variación se refiere a la dependencia del coeficiente de absorción del material sobre la energía de la radiación (partículas cargadas), mientras para fotones se define en términos del coeficiente de absorción masa-energía, μ_{en} / ρ .

La respuesta a la energía para fotones $S_E(E)$ se define como

$$S_E(E) = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{ref}} \quad (14)$$

Donde los subíndices m y ref . Indican al material que se trabaja y al material referencia, respectivamente. El aire se usa normalmente como material de referencia.

La pérdida de energía puede transferirse en producción de pares, dispersión Compton o efecto fotoeléctrico, donde la dependencia del proceso viene en función de la energía del fotón y del número atómico efectivo, Z_{eff} . Fig. 12.

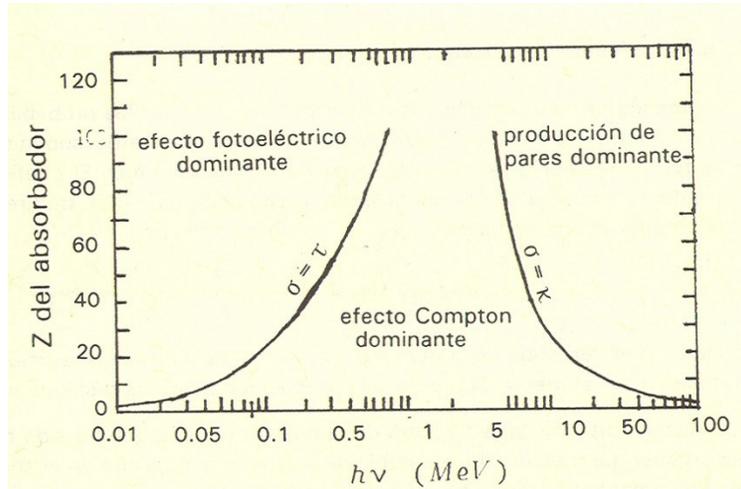


Fig. 12. Representación de las regiones de energía y número atómico efectivo en las que se presentan los procesos de interacción de la radiación con la materia. La componente fotoeléctrica varía como Z_{eff}^3 , mientras Compton varía como Z_{eff} / M (M es la masa molar del material TLD) y la producción de pares varía con Z_{eff}^2 .

En la práctica se utiliza la respuesta relativa a la energía (RER) definida respecto a los fotones de 1.25 MeV del ^{60}Co

$$(RER)_E = \frac{S_E(E)}{S_E(1.25\text{MeV}^{60}\text{Co})} \quad (15)$$

La respuesta de un material TLD a partículas β es más compleja. Las partículas cargadas pierden energía en pequeños incrementos, sufriendo muchas colisiones e interacciones radiactivas. Esta pérdida de energía es reflejada en la potencia de frenado $\left. \frac{dT}{dx} \right|_{E, Z_{\text{eff}}}$, donde x es la penetración en el

material, la que depende de la energía de la partícula β . Por tanto la medida de la intensidad TL dependerá de la energía cuando el espesor del material TLD es más grande que el alcance de las partículas β .

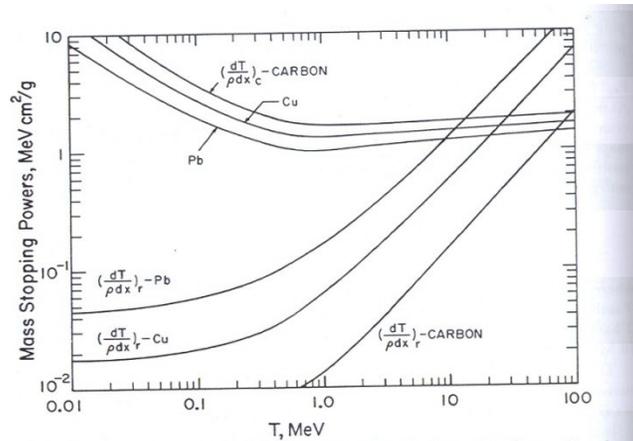


Fig. 13. Potencia de frenado por unidad de masa para partículas β al interactuar con diferentes elementos químicos.

En general la dependencia de la energía para partículas β presenta un incremento de la respuesta TL con la energía de las partículas β , y se estabiliza cuando la penetración excede el espesor del material. Fig. 14.

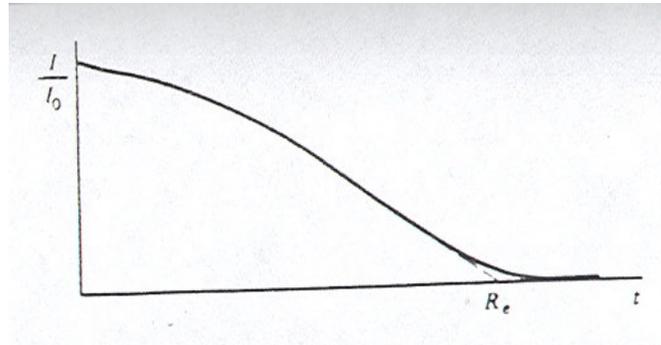


Fig. 14. Razón de Intensidades contra distancia de penetración en un material

VII. JUSTIFICACIÓN.

Este trabajo de investigación es importante y se justifica desde dos puntos de vista: el personal y el colectivo. Desde el punto de vista personal significa una continuidad en la preparación académica y un logro en las aspiraciones de superación como persona.

Desde el punto de vista colectivo el cierre de este ciclo de formación académica implica para el I.P.N. una mejora sustancial en la preparación de sus Profesores a nivel superior, en mi caso como Profesor de asignatura B de la U.P.I.I.C.S.A. la cual es una unidad interdisciplinaria donde se preparan estudiantes de ingeniería, el área donde se ubica este trabajo de investigación abre una perspectiva diferente tanto para el estudiante de ingeniería como para el profesor de aplicación de la física y otras áreas del conocimiento humano en su vida diaria, y tal vez profesional. Además el estudio de nuevos materiales TL con posibles características dosimétricas ha hecho de los fluoruros dobles en dosimetría una necesidad, ya que presentan una mejora considerable en la sensibilidad y respuesta TL comparativamente con los materiales TL comerciales los cuales tienen uso en medicina, y otras áreas.

VIII. OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar las propiedades termoluminiscentes del fluoruro doble de potasio e itrio (K_2YF_5) dopados con la tierra rara: Terbio (Tb), al exponerlo a radiación ionizante de una fuente de radiación beta

Como objetivos particulares se tienen:

- *Determinar la respuesta termoluminiscente del material estudiado al irradiarlo con radiación beta, variando parámetros como la concertación del dopante y los tratamientos térmicos aplicados a los materiales.*
- *Probar y analizar el modelo de Mckeever para un material Termoluminiscencia, y aplicarlo al K_2YF_5 .*
- *Determinar los parámetros cinéticos para los picos TL de la curva de brillo del K_2YF_5 , por los métodos de: Decaimiento Isotérmico y la intensidad media del pico TL.*

IX. MATERIALES Y METODO EXPERIMENTAL.

1. Materiales.

El estudio de los fluoruros dobles de potasio e itrio dopados con tierras raras se propone aproximadamente en el año de 1994 por el grupo de trabajo de Dr. Ricardo B. Barthem, con fines de estudios ópticos con aplicaciones en Láseres o sistemas relacionados con iluminación. Así que ellos proponen un estudio de tierras raras (en particular de Nd^{+3} y Pr^{+3}) en cristales de sistemas del tipo AF-LnF_3 , donde A es un metal alcalino, como: LiKYF_5 , CsGd_2F_7 y K_2YF_5 ^{6,7} los cuales fueron obtenidos por síntesis hidrotermal a una temperatura de 750 K y presiones de 100-150 MPa. Así C. F. Crespo y R. B. Barthem reportan en: ESPECTROSCOPIA DE IONS Nd^{+3} NA REDE K_2YF_5 , bandas de absorción localizadas en 355, 472, 478, 575, 590, 680, y 873 nm supuestamente sensibles a concentraciones de iones y posibles aplicaciones en Láseres.

También reportan Marcazzo S. J., Santiago M.A., Caselli E., Nariyama N. y Khaidukov N. M. En: LAS PROPIEDADES TL DEL COMPUESTO $\text{K}_2\text{YF}_5: \text{Pr}^{+3}$, que la eficiencia de estos fósforos es considerablemente mayor al dosímetro comercial TLD-700 y que la de otros fluoruros dopados con Pr^{+3} . Además la curva de brillo del $\text{K}_2\text{YF}_5: \text{Pr}^{+3}$ presenta un bajo desvanecimiento a temperatura ambiente y una alta repetitividad después de sucesivas repeticiones. Por lo que lo consideran un material promisorio para dosímetro TL de radiación ionizante.

D. McLean, J. Varas y N. M. Khaidukov presentaron en el póster titulado: THERMOLUMINESCENT DOSIMETRY EXPERIENCE WITH K_2YF_5 MATERIALS USING BETA AND X-RAY SOURCES, el material aquí trabajado estaba dopado con Tb^{+3} al 10%, reportan una comparativa de la curva de este material con otros materiales comerciales al ser expuestos a 77 kVp.

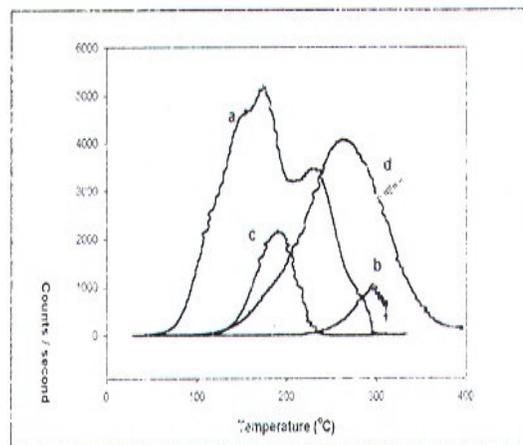


Fig. 15. Sensibilidades relativas de materiales comerciales: a) TLD-200, b) TLD-400, c) TLD-500, comparadas con d) $\text{K}_2\text{YF}_5: \text{Tb}^{+3}$ (10%) expuestos a 77 kVp.

Reportan que tres picos a 73 °C, 231°C y ~400 °C donde las trampas a altas temperaturas no pueden ser removidas a través de procesos de recocido. También reportan una migración de la energía en trampas de alta temperatura a sitios de más baja temperatura, exhibiendo un efecto de desvanecimiento reversito. También observan cambios apreciables en la forma de la curva de brillo al variar la

concentración de dopaje y la fuente de irradiación. Consideran que este material tiene buenas posibilidades de aplicaciones dosimétricas en Rayos X.

L. O. Faria y colaboradores⁸ reportan en 2004 haber trabajado con $K_2YF_5: Tb^{+3}$ dopado en concentraciones de 0.2, 10 y 50% fueron irradiados con rayos gama y X observando una buena sensibilidad y respuesta a la energía en dependencia con la concentración de dopaje de Tb. También reportan que el máximo de respuesta TL se encuentra en el material dopado al 10%, en el pico a 269 °C con una respuesta a la dosis prácticamente lineal y una buena reproducibilidad de las dosis medidas. El pico dosimétrico principal después de una deconvolución mostró estar compuesto de dos picos: 210 y 269 °C, ambos presentan una buena linealidad a la respuesta a la dosis absorbida. También se reportaron que la señal TL del material dopado a 10 % de concentración es 10 veces mayor que la del TLD-100 irradiado con una misma fuente (^{137}Cs) de gammas bajo las mismas condiciones. Nuevamente se considera que es un material prominente para dosímetro de radiación.

J. Azorín Nieto y colaboradores⁹ reportan en 2004 haber trabajado con K_2YF_5 , K_2GdF_5 y $K_2LuF_5: Tb^{+3}$, donde el primero y el tercer material al estar dopados al 1% presentan una buena respuesta TL al irradiarlos con radiación beta y con luz UV. También reportan sus curvas de brillo al ser irradiados con una fuente ($^{90}Sr/^{90}Y$) radiación beta, UV y una fuente (^{137}Cs) radiación gamma. Además determinan los parámetros cinéticos para $K_2YF_5: Tb^{+3}$ dopado al 1% para los dos picos reportados: 187 y 283 °C, mediante el método de varias velocidades de calentamiento encontrando las energías de activación: 0.9 y 1.07 eV respectivamente para cada pico y un factor de frecuencia: 4.7×10^9 y 2.5×10^9 s⁻¹ respectivamente para cada pico.

En 2005 A. A. Gallegos y colaboradores¹⁰ reportan en la Conf. Int. Y XVII Cong. Nac. Sobre Dos. De Edo. Sol. Haber trabajado el $K_2YF_5: Tb^{+3}$ dopado al 0.8, 0.9 y 0.99, donde presentan las curvas de brillo de ellos. Además se reportó también los parámetros cinéticos para los picos encontrados en las curvas de brillo. En 2006 J. Azorín Nieto y colaboradores¹⁵ se publicaron los resultados de la TL y fotoluminiscencia del $K_2YF_5: Tb^{+3}$ irradiado con partículas beta, reportando la energía de activación del pico ubicado en 300 °C, en 2007 J. Azorín Nieto y colaboradores²⁴ continuando con el trabajo para $K_2YF_5: Tb^{+3}$ les fue aceptado y esta en prensa el artículo Determination of the kinetic parameters of $K_2YF_5: Tb$ from isothermal decay of thermoluminescence, en la revista Nuclear Instrument & Methods in Physics Research, en el cual se reportan las energías de activación para este material por calculadas por el método de decaimiento isotérmico.

2. Método Experimental.

Se procedió a trabajar experimentalmente el material K_2YF_5 , el cual consiste de polvo cristalino dopado con terbio (Tb) en concentraciones de 0.8 % marcado con la leyenda 528, 0.99% marcado con la leyenda XVII-10 y 0.99% marcado con la leyenda 85, con masa total de 1349 mg, 170.4 mg y 93.8 mg, respectivamente. Los materiales individualmente fueron sometidos a un flujo de radiación de partículas beta de ~1 MeV de energía, provenientes de una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$, con una rapidez de dosis para el 19 del abril del 2005 de 21.50696 mGy/min., durante 11 min. Una vez irradiados individualmente se estimuló la emisión TL en la plancheta del lector Harshaw TLD 4000 calcinando el material con una razón de calentamiento de 10 °C/s durante un tiempo de 70 sg, con un precalentamiento de 100 °C instantáneo y una temperatura máxima de calcinado de 450 °C. Durante la estimulación se liberan las trampas ocupadas, emitiéndose luz la cual es registrada por el lector. Este registro se conoce como curva de brillo TL. Esta primera curva de brillo se usa como curva de brillo de referencia del material estudiado.

Se realizaron tres tratamientos termales: desvanecimiento a temperatura ambiente, estimulación de trampas a temperatura mayor a la ambiente y desvanecimiento a temperatura mayor a la ambiente.

Se trabajo inicialmente con la muestra 528, realizándole un monitoreo del tiempo aproximado de desvanecimiento, el cual consistió en: Una vez que se tenía la curva de brillo de referencia para radiación beta, esta fue aislada a temperatura ambiente durante un día para observar el desvanecimiento natural de los picos TL, en especial el de mayor intensidad TL, en un nuevo registro. Inmediatamente se le realizo una segunda lectura con los mismos parámetros de entrada en el lector para estimular las trampas restante, de tal forma que la lectura de la dosis fuera menor igual a la lectura de fondo del lector, la cual se realizaba antes de empezar cualquier registro.

Ya que se tenía una idea a priori del tiempo de desvanecimiento, se inicio nuevamente el procedimiento con la intención de visualizar solamente el pico dosimétrico que seria el de mayor tiempo de desvanecimiento, y al cual se le aplicaría el método de la intensidad media de la forma del pico para determinar sus parámetros cinéticos.

Este mismo proceso experimental se repitió con las muestras restantes, con la misma finalidad.

La estimulación de trampas a temperatura mayor a la ambiente se realizo únicamente a la muestra 528. La muestra fue dividida en 5 partes “aproximadamente iguales”, después de ser irradiada. Después de ser dividida cada parte se le realizo un registro de su curva de brillo de referencia, “inmediatamente” después fueron introducidas al horno para ser horneada a 100°C durante un tiempo específico para cada parte en el intervalo de $0 < t < 105$ min., con la finalidad de hacer un monitoreo secuenciado en un intervalo de tiempo pequeño, comparado con el tiempo de desvanecimiento natural, del desvanecimiento del pico dosimétrico, a una temperatura de aproximadamente cuatro veces mayor a la ambiente.

Para el último tratamiento termal, después de irradiar la muestra 528 completa, esta se introdujo al horno para ser horneada a 100°C durante tiempo t_0 . Después de ser horneada se tomo un registro de la curva de brillo al tiempo t_0 de horneado. Inmediatamente se realizo una segunda lectura para estimular las trampas restante, y limpiar el material de cualquier emisión TL remanente, para poder volver a iniciar el proceso de desvanecimiento a 100 °C, pero a un tiempo de horneado mayor a t_0 . El procedimiento se repitió varias veces a diferentes tiempos para el monitoreo de todos los picos presente en la curva de brillo de referencia. Este procedimiento fue repetido nuevamente a 125 °C, con la finalidad de utilizar ambos monitoreos para determinar los parámetros cinéticos de los picos TL que se observen en la curva de brillo de referencia, mediante el método de decaimiento isotérmico.

Este mismo procedimiento completo fue repetido para la muestra 85, a las temperaturas de 125 y 150 °C.

Por ultimo se estudio el comportamiento de los materiales 528 y 85 al ser irradiados a diferentes dosis, con la fuente de radiación beta.

3. Métodos para determinación de los parámetros cinéticos.

i. Método de decaimiento isotérmico.

Como se observo antes la fosforescencia por su comportamiento de decaimiento de la luminiscencia termalmente estimulada como una función del tiempo a una temperatura constante, puede ser considerado termoluminiscencia¹⁶. Además la fosforescencia presenta una curva de decaimiento luminiscente que puede ser utilizada para evaluar tanto el proceso involucrado (la TL) como los parámetros cinéticos.

El decaimiento fosforescente mas sencillo ó de primer orden, en el cual solo se involucra un solo estado atrapante y un solo tipo centro de recombinación, exhibe un decaimiento fosforescente dado por

$$I(t) = I_0 \exp\{-pt\} \quad (16)$$

Donde p^{-1} es el tiempo de vida del un portador de carga en un estado meta estable. Y esta dado por

$$p = s \exp\left\{\frac{-E_t}{kT}\right\}. \quad (17)$$

Así de la ecuación (16) se puede escribir

$$\ln I - \ln I_0 = -pt \quad (18)$$

Por lo que al graficar $\ln I(t)$ contra t se observa que exhibe un comportamiento lineal con una pendiente dada por “-p”. Fig. 16.

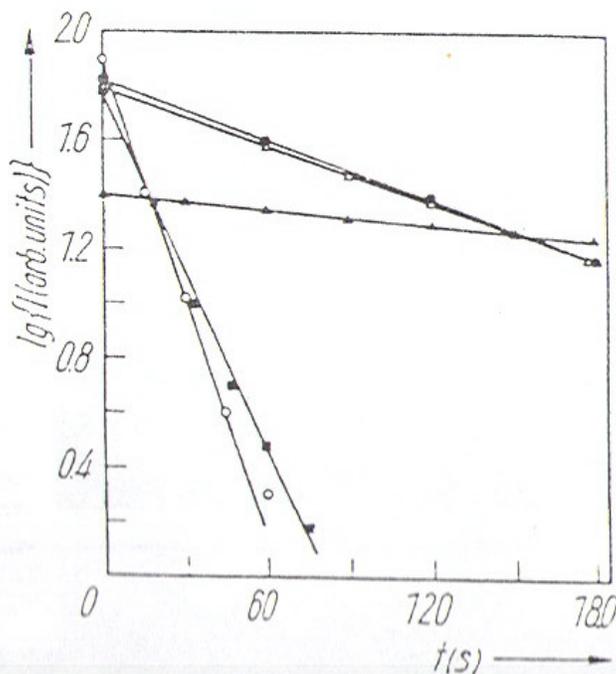


Fig. 16 Decaimiento fosforescente del KCl: Sn a diferentes temperaturas.

Por tanto se enuncia una propiedad de una curva de primer orden el cual establece que la pendiente de la recta $\ln I(t)$ vs. t debe ser “-p”, entonces para cada “p” a una temperatura “T” dada, la ecuación (17) establece una relación con los parámetros cinéticos E_t y s . Si se desea evaluar esos parámetros, se puede repetir la medida a una segunda temperatura diferente y obtener una segunda ecuación con E_t y s . Resolviendo el sistema de dos ecuaciones con las incógnitas E_t y s estas pueden ser determinadas. Cuando el intervalo de temperaturas trabajado es bastante ancho que el efecto de trampas mas profundas cercanas empieza a mostrarse, esto se revela en el cambio de la pendiente del $\ln p$ vs. $1/T$. Y se complica cuando las trampas involucradas tienen energías de activación casi iguales, por lo que un decaimiento exponencial puro no se revela, incluso cuando un primer orden cinético en la curva de brillo esta presente.

Cuando no solo un estado atrapante y un centro de recombinación están involucrados, entonces se puede presentar un comportamiento de segundo orden cinético, el que involucra dos estados de atrapantes, y el cual esta gobernado por la ecuación

$$I = -\frac{dn}{dt} = p'n^2 \quad (19)$$

donde $p' = s' \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\}$. La solución de esta ecuación es

$$I(t) = \frac{I_0}{(1 + p'n_0 t)^2} \quad (20)$$

La valides de esta expresión puede se verificada graficando $\sqrt{\frac{I_0}{I}}$ como función del tiempo t. En esta situación un línea se espera con una pendiente dada por $n_0 p' = n_0 s' \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\}$. Fig. 17.

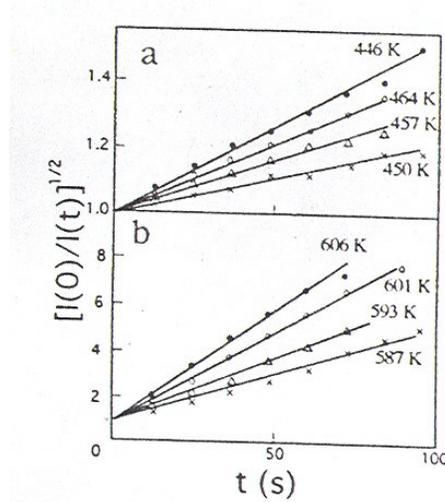


Fig. 17. Grafica de $[I_0/I]^{1/2}$ vs. t para el decaimiento fosforescente de la Dolomita natural.

Aquí también se establece que la temperatura puede ser variada y los parámetros E_t y $s'n_0$ pueden ser evaluados.

Continuando a lo largo de la misma línea, se puede considerar la curva de decaimiento en el caso donde es de "Orden General"¹⁷. La ecuación que gobierna este caso es

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) n^b = p'n^b \quad (21)$$

donde b obtiene valores entre, 0.7 y 2.5¹¹. A una temperatura constante T, la solución de la ecuación es

$$I(t) = \frac{n_0^b s'' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}{\left[1 + s'' n_0^{b-1} (b-1)t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)\right]^{\frac{b}{b-1}}} = \frac{I_0}{\left[1 + s(b-1)t \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)\right]^{\frac{b}{b-1}}} \quad (22)$$

este también es un decaimiento función del tiempo. La característica de orden general del decaimiento fosforescente puede demostrarse si una grafica de $I^{(1-b)/b}$ vs. t predice una línea . Donde b se ajustar empíricamente. Pero Chen y Kristianpoller¹² han estudiado la forma de la curva TL para diferentes valores del orden cinético b . Ellos encontraron una correlación uno a uno entre el orden cinético y “el

factor de simetría” μ_g definido como $\mu_g = \frac{\delta}{\omega}$, con $\delta = T_2 - T_M$; $\omega = T_2 - T_1$ y donde T_M , T_1 , T_2 son, respectivamente, las temperaturas en la intensidad TL máxima y los dos valores medio sobre el pico TL estudiado. Para determinar el orden cinético se usa la figura 18.

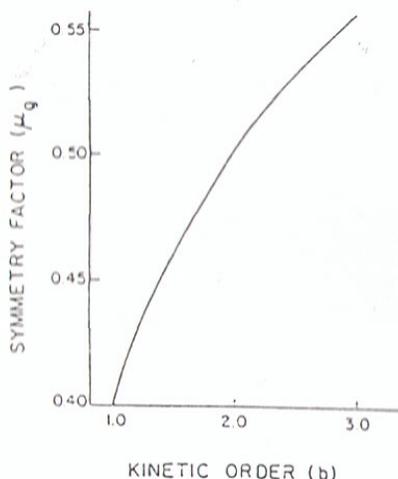


Fig. 18. Grafica para la determinación del orden cinético de la curva de brillo a partir de la relación factor de simetría vs. orden cinético de acuerdo a Chen y Kristianpoller¹².

ii. Método de la intensidad máxima TL media de la curva TL (Método de la forma del pico).

El termino de la forma del pico esta reservado para los métodos en los cuales los parámetros cinéticos son evaluados usando una pequeña cantidad de puntos extraídos de la curva de brillo. En un pico aislado de una curva de brillo TL, obtenida usando una razón de calentamiento lineal, puede se caracterizado por algunos parámetros que se pueden ver en la figura 19.

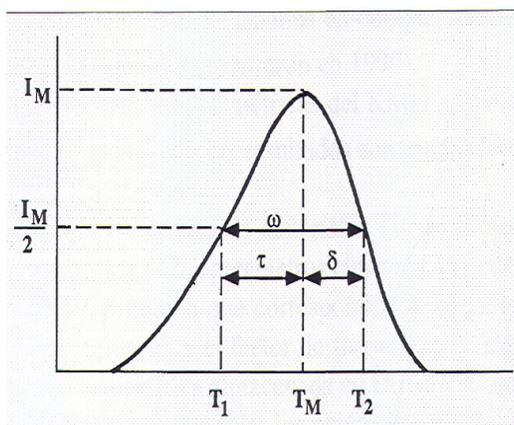


Fig. 19. Los parámetros geométricos que caracterizan un pico aislado¹⁴.

Esta curva presenta ciertas propiedades de simetría, llamadas propiedades de simetría de un pico TL: Cuando el pico se dice de primer orden debe tener una forma asimétrica, semejante a una “lorenziana”. Cuando el pico se dice de segundo orden es caracterizado por una forma simétrica, similar a una “gaussiana”(Fig. 20).

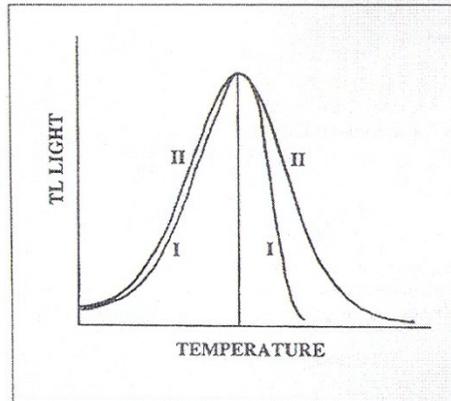


Fig. 20 Representación grafica de curva de primer orden cinético y segundo orden cinético.

De acuerdo a la figura 19 , se pueden determinar los siguientes parámetros: T_M , T_1 , T_2 son respectivamente la temperatura del pico en el máximo y las temperaturas a cada lado de la temperatura en el máximo , correspondiente a la intensidad media, $\tau = T_M - T_1$: es el ancho medio en el lado de la temperatura baja del pico, $\delta = T_2 - T_M$: es el ancho medio hacia donde decae el pico TL,, $\omega = T_2 - T_1$: es el ancho medio total, y $\mu_g = \delta/\omega$: es le factor simetría. Además en un pico de primer orden debido a su asimetría, τ es casi el 50% más grande que δ . Y el factor μ_g es igual a 0.42 para primer orden cinético, y 0.52 en el caso de un pico de segundo orden cinético, así que la siguiente relación puede ser deducida $|0.52 - \mu_g| - |0.42 - \mu_g|^{13}$. Por lo que si la relación anterior es menor que cero, un orden cinético ó una tendencia puede ser considerado; Si el resultado de la relación anterior es mayor que cero, entonces un primer orden cinético ó una tendencia es posible. Se puede concluir^{4,13}:

- ✓ μ_g es prácticamente independiente de E_t , en el intervalo de 0.1 a 1.6 eV, y de s en el intervalo de 10^5 a $10^{13} s^{-1}$,
- ✓ μ_g es fuertemente dependiente del orden cinético, b , en el intervalo de $0.7 \leq b \leq 2.5$,
- ✓ Otro factor, llamado $\gamma = \delta/\tau$, esta definido en el intervalo de 0.7 a 0.8 para primer orden cinético, y de 1.05 a 1.20 para segundo orden cinético.

Por lo que el método de la forma del pico TL es una importante caracterización geométrica y anchamente usada para la investigación de estados atrapantes en un material TL. Diferentes autores han deducido empíricamente expresiones que relacionan a la temperatura media y las intensidades medias de la emisión máxima, con la energía de activación de la trampa (ó trampas) de un pico TL aislado, a diferentes precisiones. Una vez que la energía de activación de una trampa “especifica” es conocida entonces es posible calcular el factor de frecuencia respectivo.

Diferentes métodos se desarrollaron dentro del modelo de la máxima intensidad media de la forma de un pico TL; Por lo que varias expresiones existen para determinar la energía de activación de una trampa, relacionada a un pico TL aislados. Dentro de esas expresiones las más fiables^{13,14} se enuncian en la tabla 1.

AUTOR	Orden	ECUACION	
Grossiener	1 E R	$(E_G)_\tau = 1.41k \frac{T_1 T_M}{\tau}$	
	2 D O	$(E_G)_\tau = 1.68k \frac{T_1 T_M}{\tau}$	
Lushchik (corregida)	1 E R	$(E_L)_\delta = 0.976 \frac{kT_M^2}{\delta}$	
	2 D O	$(E_L)_\delta = 1.706 \frac{kT_M^2}{\delta}$	
primera aproximación de Chen	1 E R	$E_\omega = 2.29 \frac{T_M^2}{\omega}$	
	2 D O	$E_\omega = 2kT_M \left(1.756 \frac{T_M}{\omega} - 1 \right)$	
Aproximación de Chen modificada	G r a l ·	$E_\alpha = c_\alpha \left(\frac{kT_M^2}{\alpha} \right) - b_\alpha (2kT_M)$ $\alpha = \tau, \delta, \omega$	$c_\tau = 1.51 + 3(\mu - 0.42)$ $b_\tau = 1.58 + 4.2(\mu - 0.42)$ $c_\delta = 0.976 + 7.3(\mu - 0.42)$ $b_\delta = 0$ $c_\omega = 2.52 + 10.2(\mu - 0.42)$ $b_\omega = 1$
	1 E R	$(E_C)_\tau = 1.51 \frac{kT_M^2}{\tau} - 3.04kT_M$ $(E_C)_\delta = 0.976 \frac{kT_M^2}{\delta}$ $(E_C)_\omega = 2.52 \frac{kT_M^2}{\omega} - 2kT_M$	
	2 D O	$(E_C)_\tau = 1.81 \frac{kT_M^2}{\tau} - 4kT_M$ $(E_C)_\delta = 0.706 \frac{kT_M^2}{\delta}$ $(E_C)_\omega = 3.54 \frac{kT_M^2}{\omega} - 2kT_M$	

Tabla 1. Expresiones más “fiables” para la determinación de la energía de activación de una trampa específica relacionada a un pico TL aislado.

iii. Método del elevamiento inicial de la curva TL (Método de la forma del pico).

Este es el método más simple y general aplicable para la evaluación de la energía de activación E_t de un pico aislado.

El método se basa en el hecho de que el extremo inicial del pico se encuentra a bajas temperaturas, y todas las trampas y centros de recombinación relevantes (y en algunos casos otros estados interactuantes) se pueden considerar que el número de ellos es casi constante. Por lo que la elevación inicial de la intensidad se puede considerar como función de la temperatura, por tanto

$$I(T) = C \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\}$$

Donde C contiene otros parámetros. De la expresión anterior se encuentra

$$\ln(I) = C_1 - \frac{E_t}{kT}.$$

Por tanto al graficar $\ln(I)$ como función del inverso de T, se espera que en el elevamiento inicial se comporte linealmente, donde es posible calcular la energía de activación E_t .

Aplicando el método a la ecuación de primer orden de Randall- Wilkins

$$I = sn \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \exp\left[-\left(\frac{s}{\beta}\right) \int_{T_0}^T \exp\left\{-\frac{E_t}{k\theta}\right\} d\theta\right],$$

considerando que n varía ligeramente durante la elevación inicial entonces $n \approx n_0$, además $T \approx T_0$ entonces la ecuación anterior se reduce a

$$I \cong sn_0 \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\} \quad (23)$$

Donde el método de elevamiento inicial es aplicable.

La situación es similar para el caso general utilizando la ecuación general "GOT", considerando $n \approx n_0$ y $m \approx m_0$ el método es aplicable.

Una modificación del método de elevación inicial sugerido primeramente por Aramu y colaboradores¹⁸, considera que el factor exponencial depende de una potencia de la temperatura T^a . Por

lo que en la elevación inicial la intensidad se comporta como $I(T) \propto T^a \exp\left\{-\frac{E_t}{kT}\right\}$ de la cual se

encuentra cuando se le aplica el método de elevación inicial $\frac{d}{dT}(\ln I) = \frac{a}{T} + \frac{E}{kT^2}$. Considerando que

la energía de activación E_t y la energía E_{ir} durante la elevación inicial de la intensidad son la misma,

entonces cuando se compara con $\frac{d}{dT}(\ln I) = \frac{E_{ir}}{kT}$ se encuentra que $E_t = E_{ir} - akT$.

Lo que significa que el valor de E_t debe ser corregido en un cierto porcentaje cuando a es conocido. Dado que kT es más pequeño que E_t , y $|a| < 2$ ¹⁹, esta dependencia de la temperatura contribuye a una pequeña corrección al valor directamente calculado por este método.

iv. Factor Pre-exponencial.

Se calcula el factor pre-exponencial, S , para una curva de brillo de orden general mediante la expresión

$$S = \left[\frac{kT_m^2 \exp\left(-\frac{E}{kT_m}\right)}{\beta E} \left(\frac{E + 2kT_m(b-1)}{E} \right) \right]^{-1} s^{-1} \quad (24)$$

v. Ecuación de Arrhenius.

La ecuación de Arrhenius nos permite calcular el tiempo de vida medio, τ , que pasa un electrón en un estado meta estable sobre el nivel de Fermi que corresponden a las trampas observadas en la curva de brillo. La ecuación de Arrhenius es

$$\tau = S^{-1} \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (25)$$

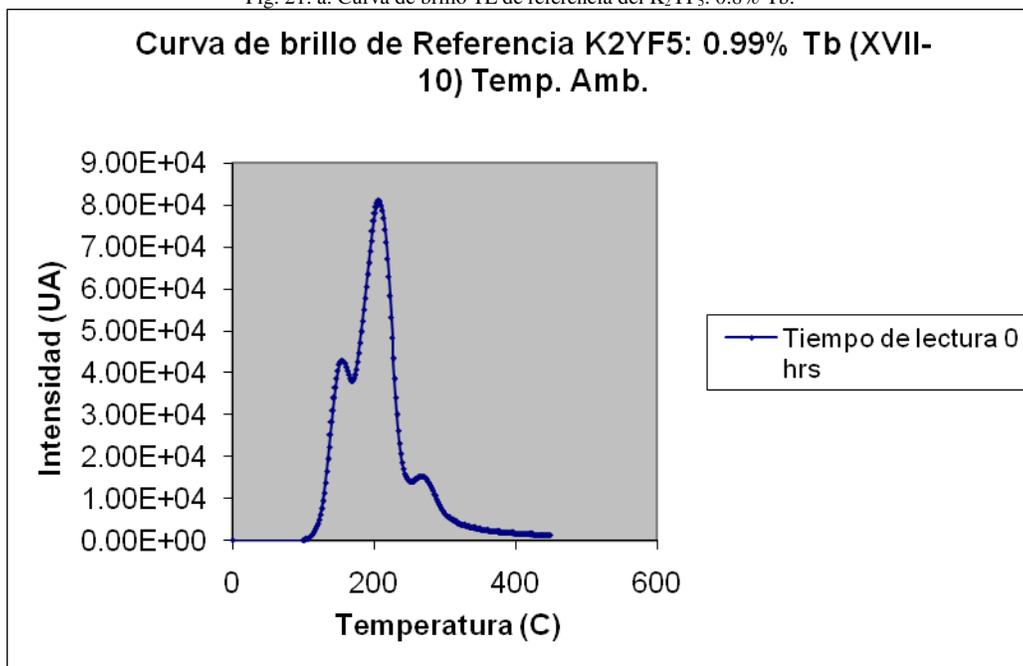
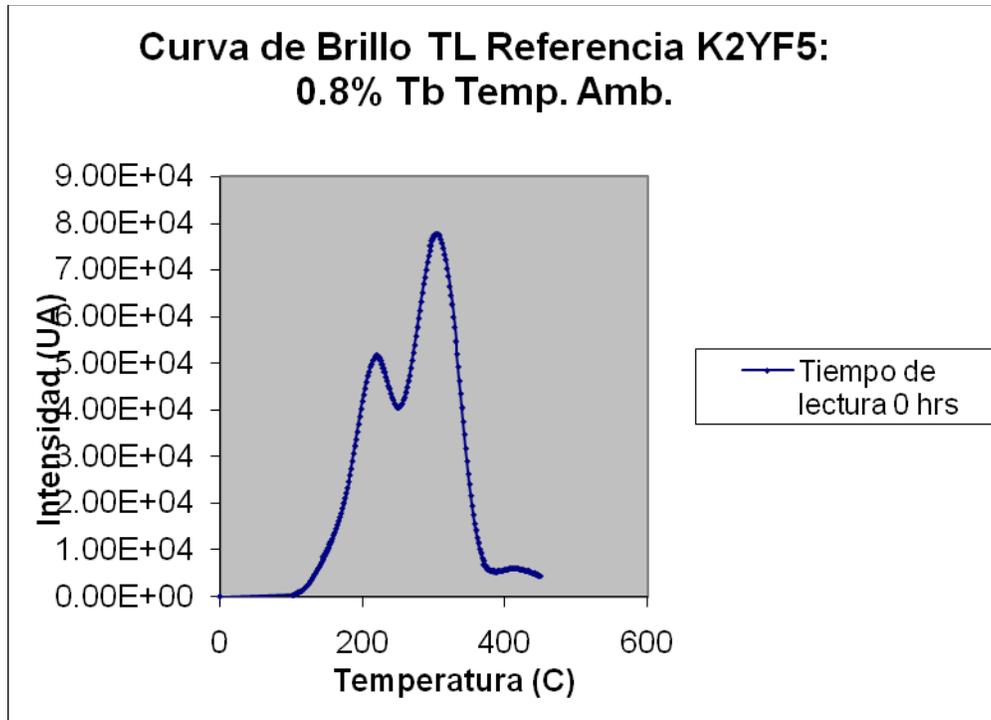
Mediante la razón de tiempo de desvanecimiento contra el tiempo de vida medio para cada trampa se puede calcular el promedio de electrones que son liberados de los estados atrapantes, n_0 .

X. RESULTADOS.

1. Propiedades dosimétricas.

a) Curvas de brillo.

Las figuras 21.a, b y c muestran las curvas de brillo obtenidas de la lectura de los materiales TL en la lectora TLD Harshaw 4000 de los materiales K_2YF_5 , dopado con terbio a diferentes porcentajes (0.8, 0.9, 0.99) como resultado al ser irradiados con 236.5726 mGy de una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Las curvas presentan tres picos característicos de diferentes intensidades. Se observa que la intensidad del pico mas alto se hace mas alto conforme el dopaje aumenta.



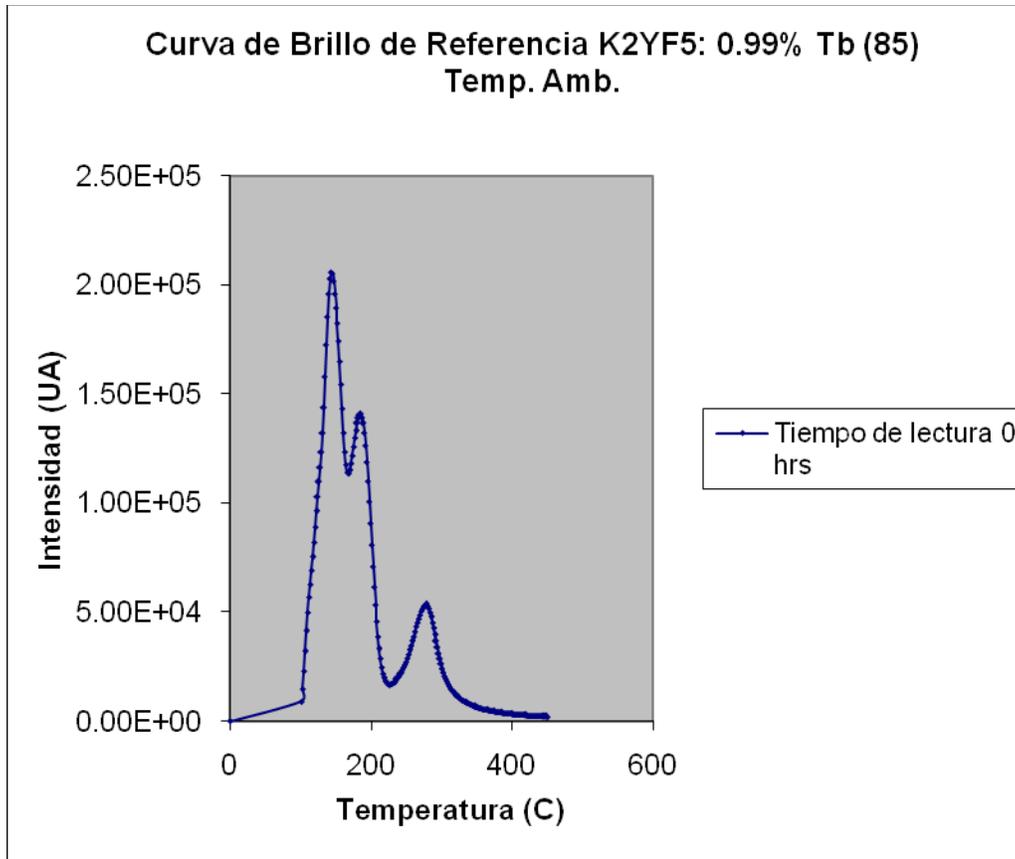


Fig. 21. c. Curva de brillo TL de referencia del K_2YF_5 : 0.99% Tb (85).

b) Respuesta TL en función dosis absorbida por pico TL.

La respuesta a la dosis de un material TL es estudiada como la respuesta por cada pico característico visible, ya que la intención es buscar y aislar el pico dosimétrico, que es aquel que presente una respuesta "lineal" a la dosis absorbida por el material TL.

En las figuras 22.a y b se presenta el comportamiento de la respuesta a la dosis absorbida en el intervalo de 10.6 mGy a 1.5 mGy del material K_2YF_5 : 0.8 % Tb, en el pico situado en aproximadamente 149 °C, además se incluye la curva de regresión para el caso lineal (Fig. 21.a) junto con su coeficiente de correlación, de la misma forma en la figura 21.b se incluye la curva de regresión polinómica de orden dos junto con el coeficiente de correlación para este ajuste. Se observan que los coeficientes de correlación son iguales para cada caso.

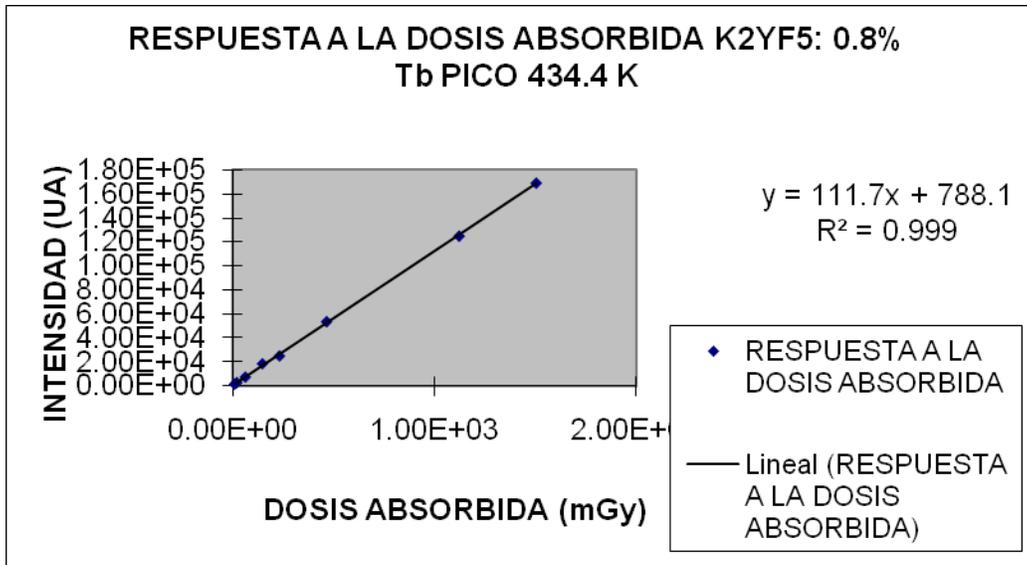


Fig. 22.a. Ajuste lineal para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.8% Tb para el pico T = 434 °K .

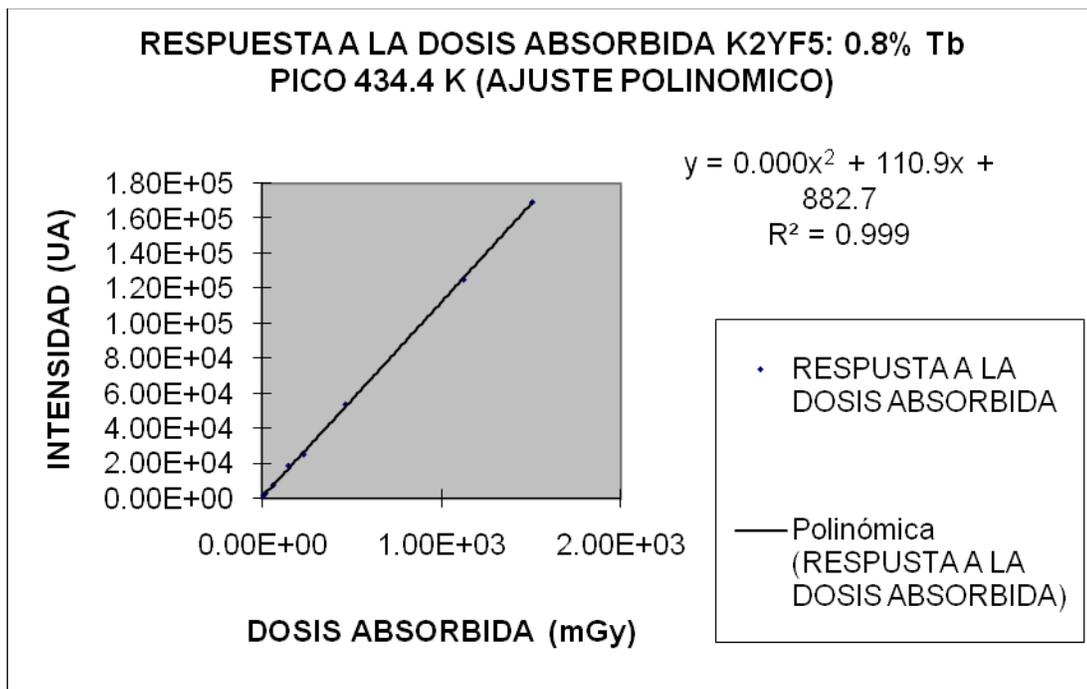


Fig. 22.a. Ajuste polinomial para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.8% Tb para el pico T = 434.4 °K .

En las figuras 23.a y b se muestra el comportamiento de la respuesta de la dosis absorbida en el intervalo de 10.6 mGy a 1.5 Gy del material K₂YF₅: 0.8% Tb al ser irradiado con una fuente de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y para el pico en 191 °C. Se grafica también la curva de regresión lineal (Fig. 23.a) y polinomial de orden: (Fig. 23.b), junto con sus respectivas correlaciones; Observándose un “mejor” coeficiente de correlación para el ajuste polinómico.

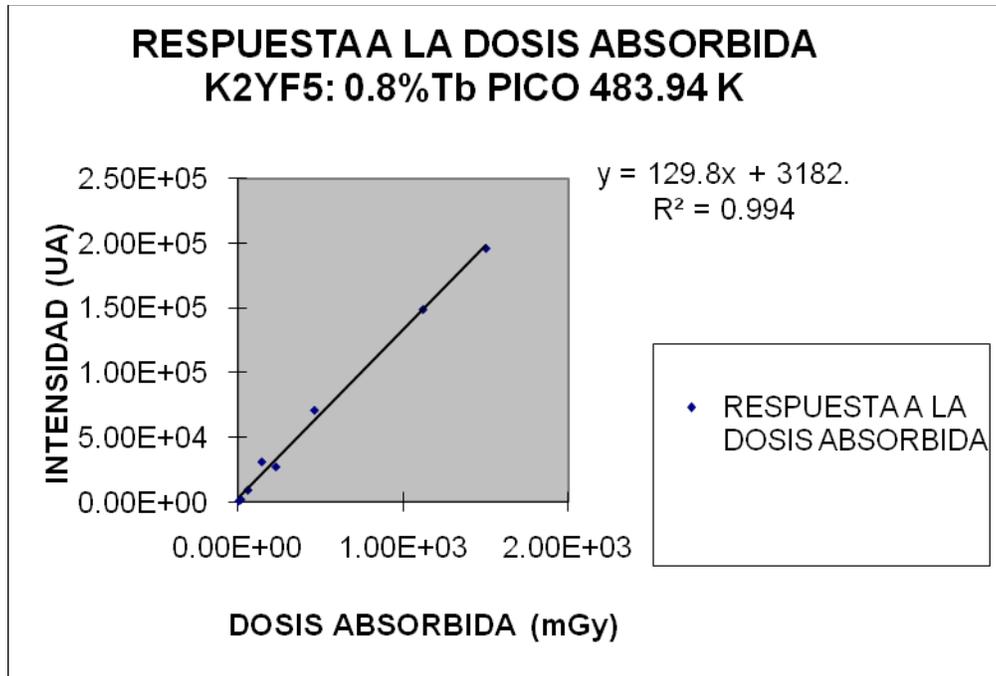


Fig. 23.a. Ajuste lineal para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.8% Tb para el pico T = 483.94 °K.

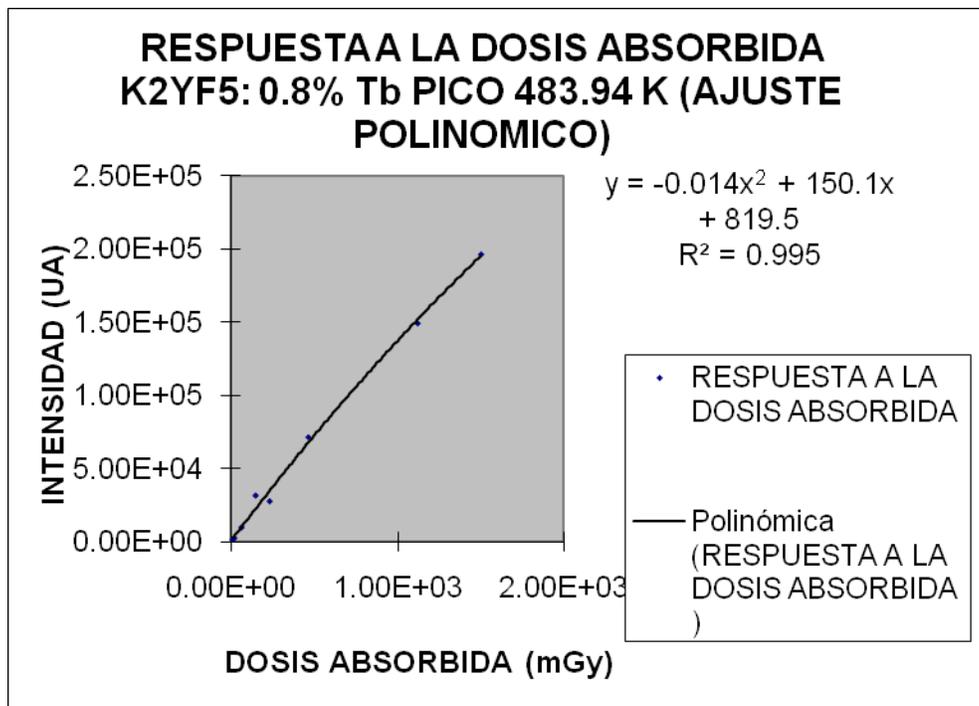


Fig. 23.b. Ajuste polinomial para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.8% Tb para el pico T = 483.94 °K.

En las figuras 24.a y b se presenta el comportamiento de la respuesta a la dosis absorbida en el intervalo de 10.6 mGy a 1.5 mGy del material K₂YF₅: 0.8 % Tb, en el pico situado en aproximadamente 247 °C, además se incluye la curva de regresión para el caso lineal (Fig. 21.a) junto con su coeficiente de correlación, de la misma forma en la figura 24.b se incluye la curva de regresión polinómica de orden dos junto con el coeficiente de correlación para este ajuste. Se observa que el coeficiente de correlación “mejora” para el caso polinómico comparativamente con el caso lineal.

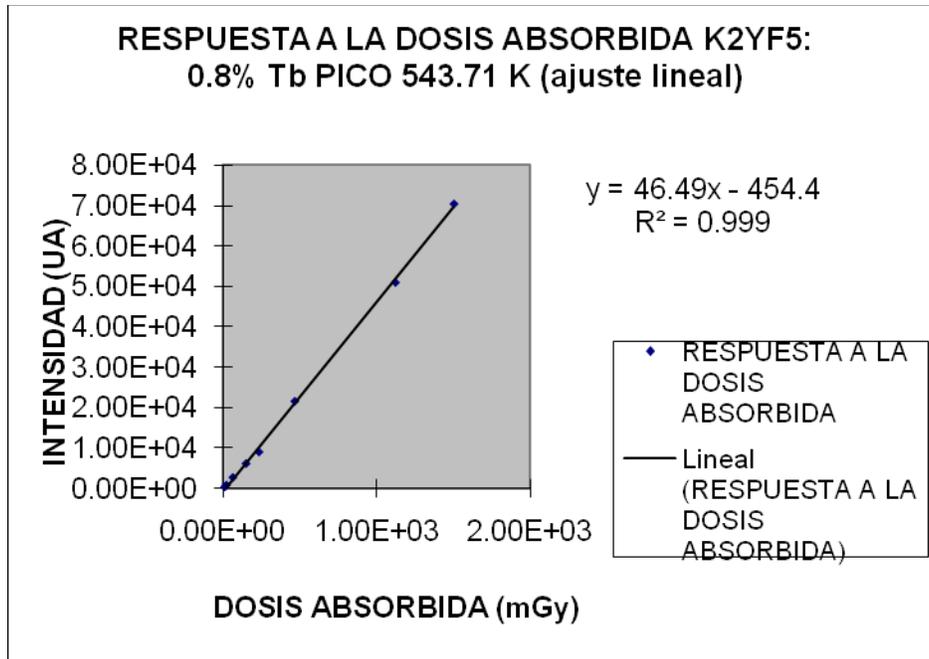


Fig. 24.a. Ajuste lineal para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.8% Tb para el pico T = 543.71 °K.

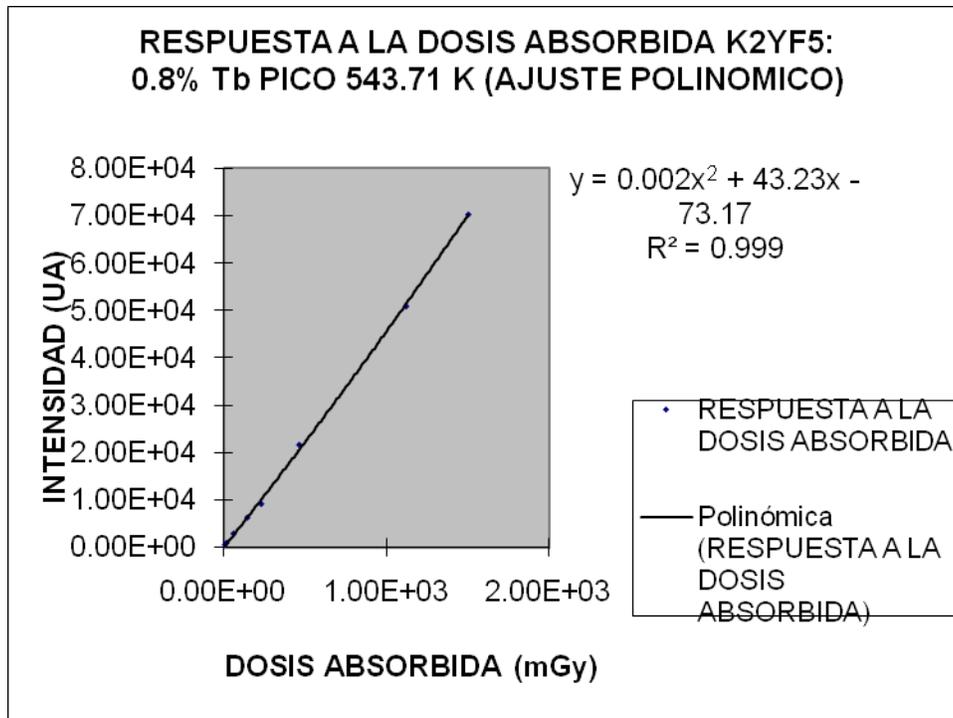


Fig. 24.b. Ajuste polinomial para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.8% Tb para el pico T = 543.71 °K.

En las figuras 25.a y b se observa la respuesta TL a la dosis absorbidas por el material K₂YF₅: 0.99% Tb, en el intervalo de 10.6 mGy a 1.5 Gy para el pico TL en 145 °C, se grafico también la curva de regresión del comportamiento de la respuesta a la dosis absorbida. Se practicaron dos diferentes ajuste: lineal y polinomial de orden dos. Se observa una mejora considerable en la correlación para el caso polinomial respecto del lineal.

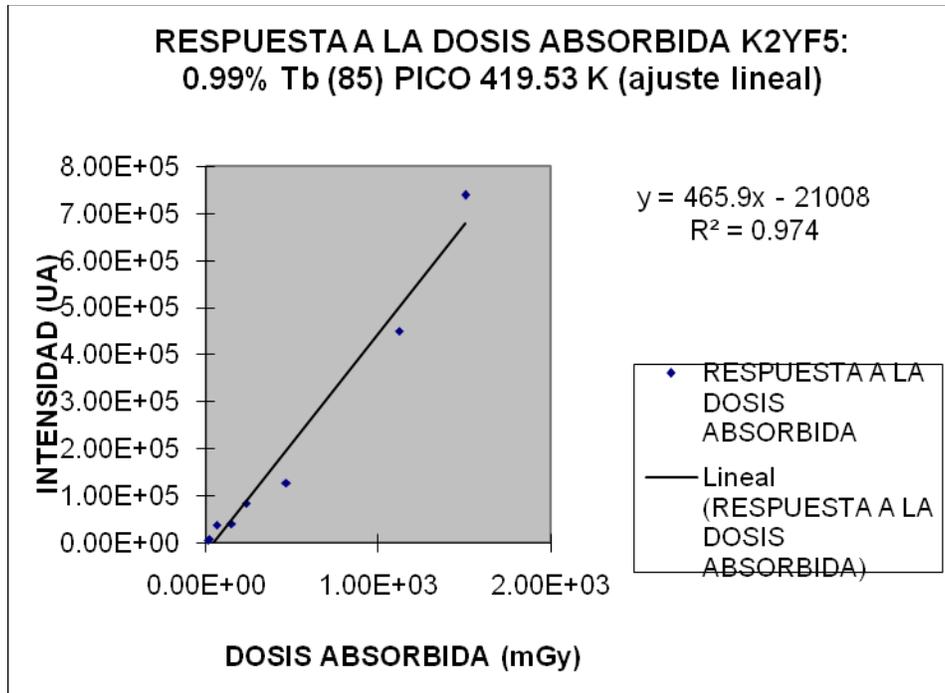


Fig. 25.a. Ajuste lineal para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.99% Tb para el pico T = 419.53 °K.

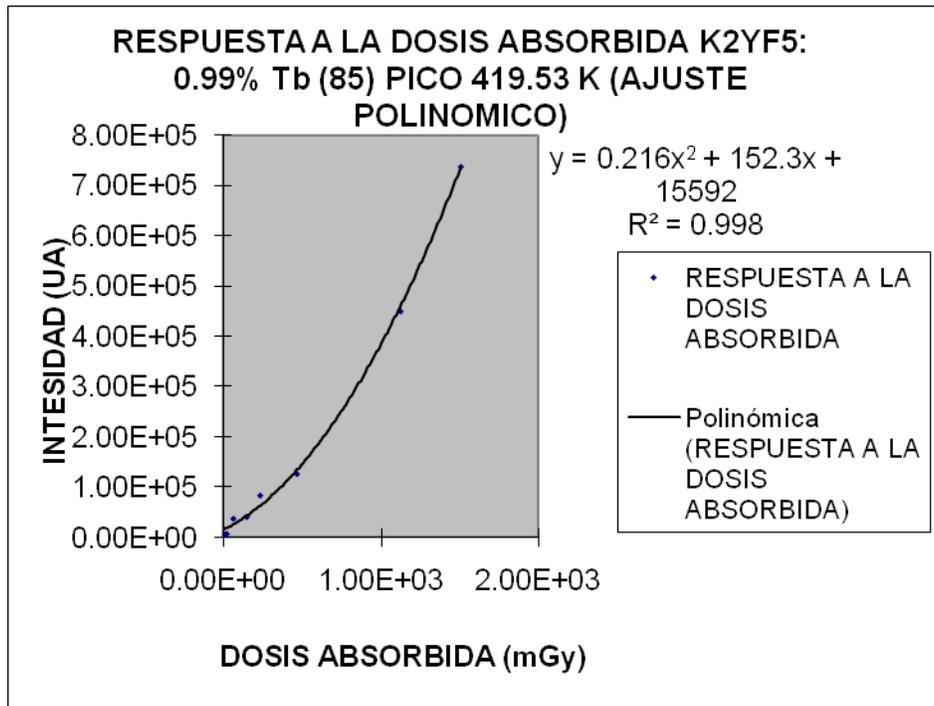


Fig. 25.b. Ajuste polinomial para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.99% Tb para el pico T = 419.53 °K.

Como en las figuras 25.a y b, en las figuras 26.a y b se observa la respuesta TL a la dosis absorbidas por el material K₂YF₅: 0.99% Tb, para el pico TL en 187 °C, se grafica también la curva de regresión del comportamiento de la respuesta a la dosis absorbida. Se practica nuevamente dos diferentes ajuste: lineal y polinomial de orden dos. Se observa una mejora considerable en la correlación para el caso polinomial respecto del lineal.

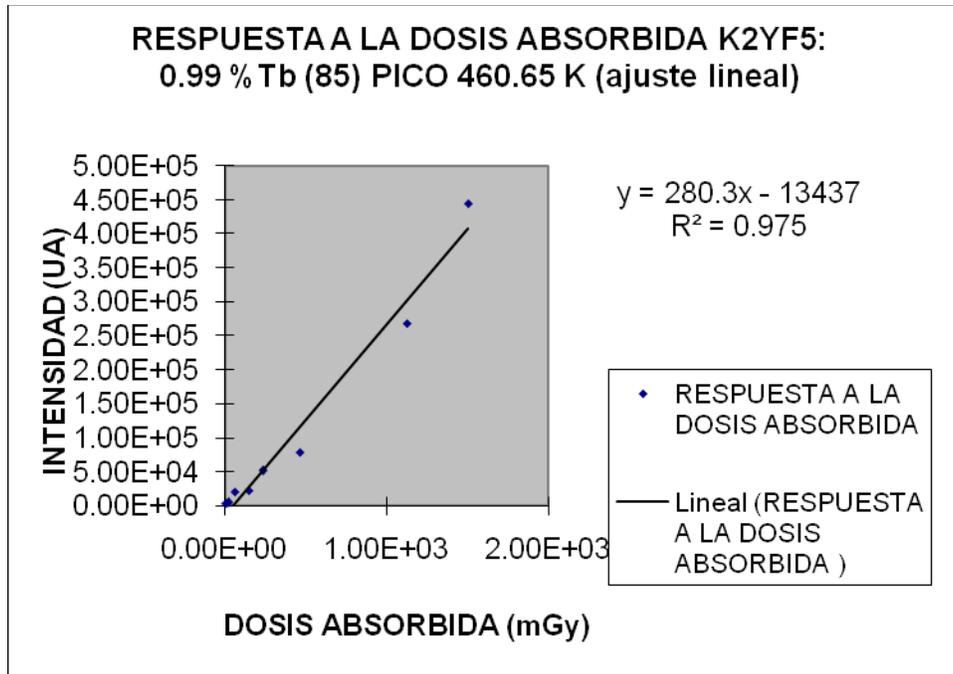


Fig. 26.a. Ajuste lineal para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.99% Tb para el pico T = 460.65 °K .

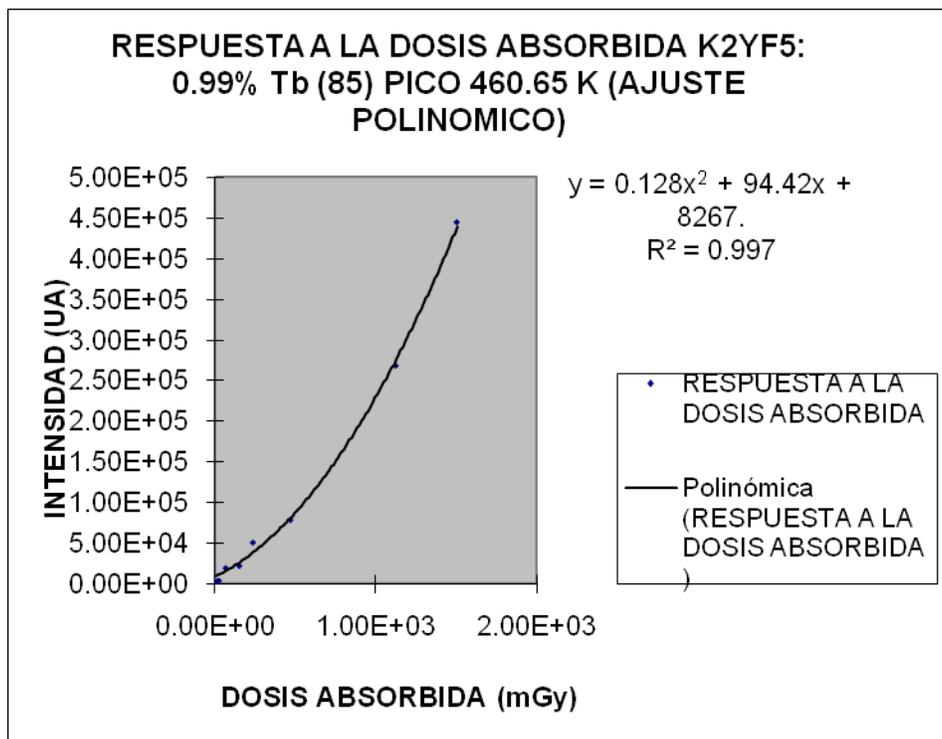


Fig. 26.b. Ajuste polinomial para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.99% Tb para el pico T = 460.65 °K .

En las figuras 27.a y b se observa la respuesta TL a la dosis absorbidas por el material K₂YF₅: 0.99% Tb, en el intervalo de 10.6 mGy a 1.5 Gy para el pico TL en 276 °C, se grafico también la curva de regresión del comportamiento de la respuesta a la dosis absorbida. Se practicaron dos diferentes ajuste: lineal y polinomial de orden dos. Se observa una mejora considerable en la correlación para el caso polinomial respecto del lineal.

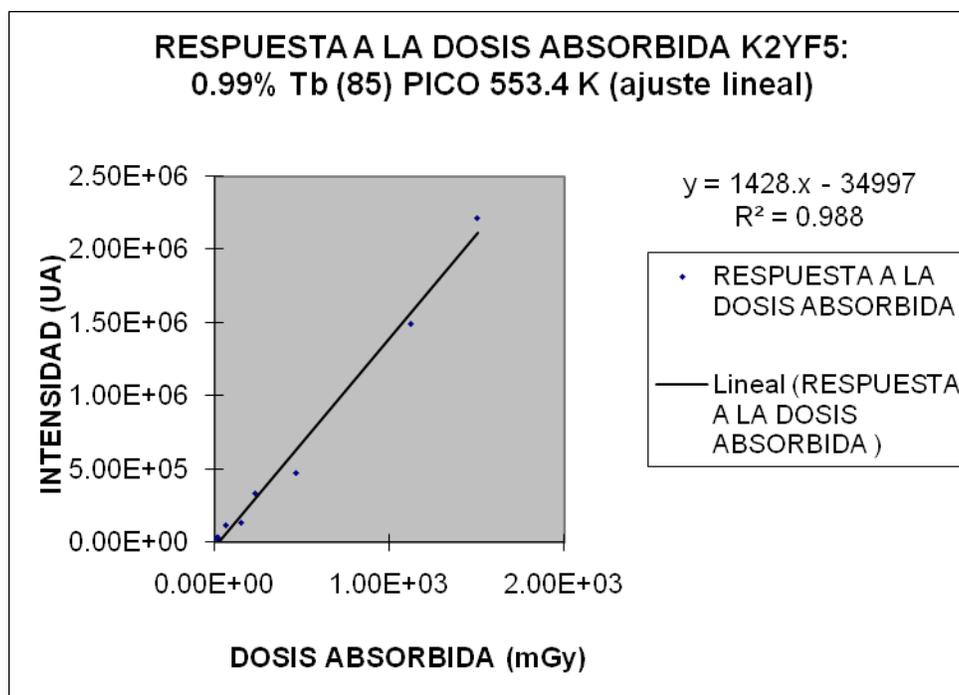


Fig. 27.a. Ajuste lineal para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.99% Tb para el pico T = 553.4 °K .

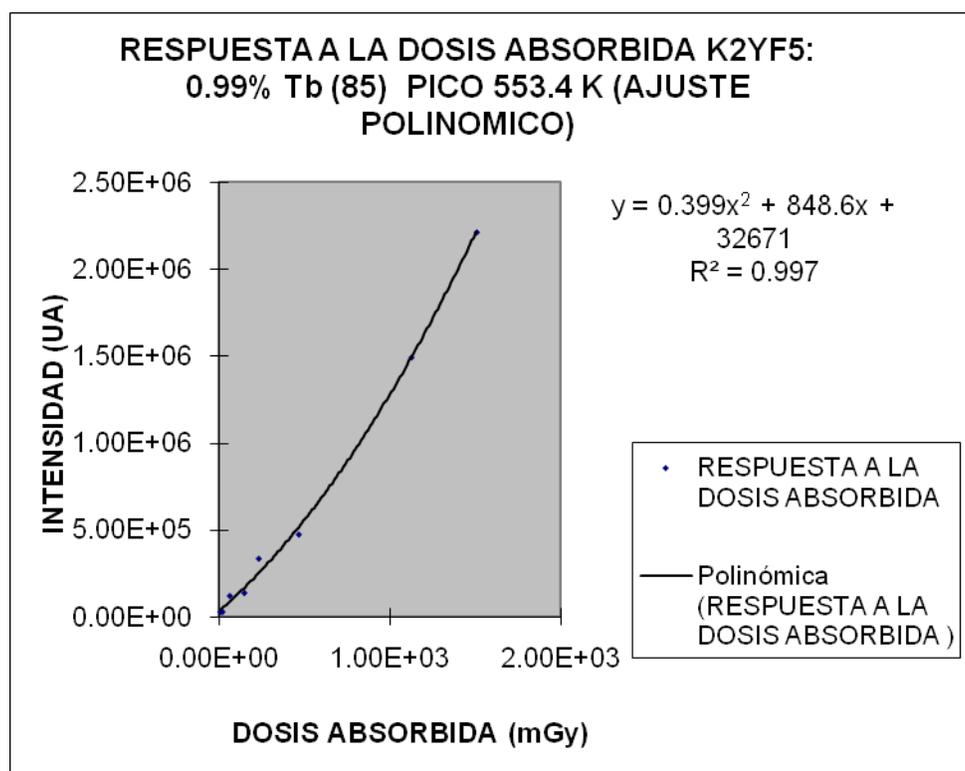


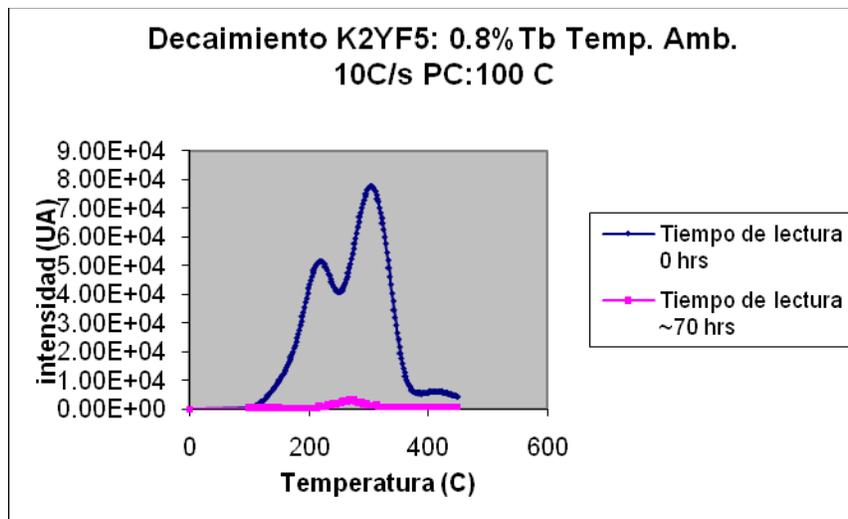
Fig. 27.b. Ajuste polinomial para la respuesta a la dosis absorbida por K₂YF₅: 0.99% Tb para el pico T = 553.4 °K .

2. Curvas de brillo para parámetros cinéticos por métodos de la forma del pico y decaimiento isotérmico a diferentes temperaturas.

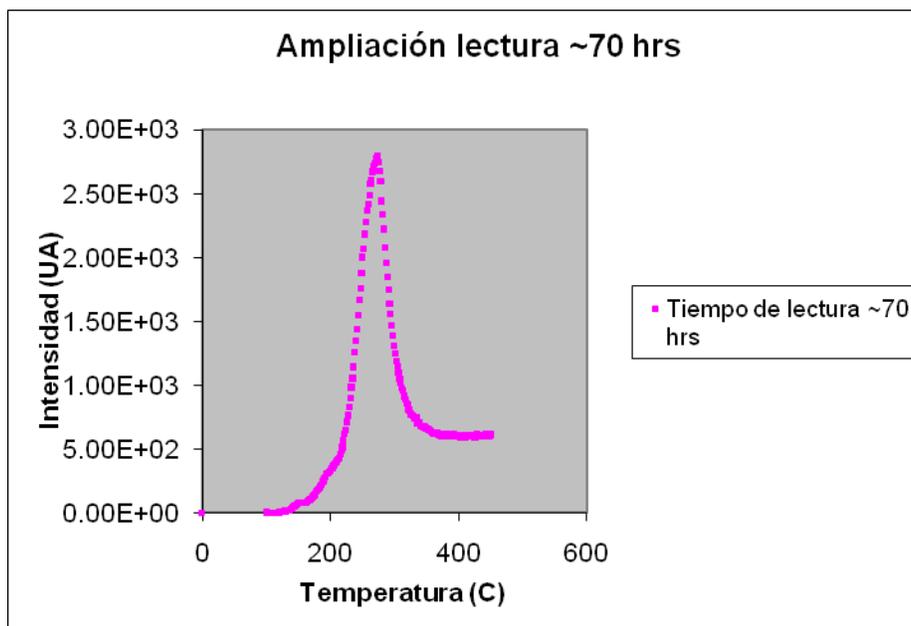
i. K_2YF_5 : Tb 0.8%.

DECAIMIENTO A TEMPERATURA AMBIENTE.

En la figura 28.a se muestra la curva de brillo del material TL K_2YF_5 : 0.8% Tb después de ser irradiado con 236.5726 mGy de una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$, además se observa también la curva de decaimiento isotérmico a temperatura ambiente después de 70 hrs. En la figura 28.b se observa la ampliación de la curva de decaimiento isotérmico del material TL K_2YF_5 : 0.8% Tb, observada en la figura 28.a.

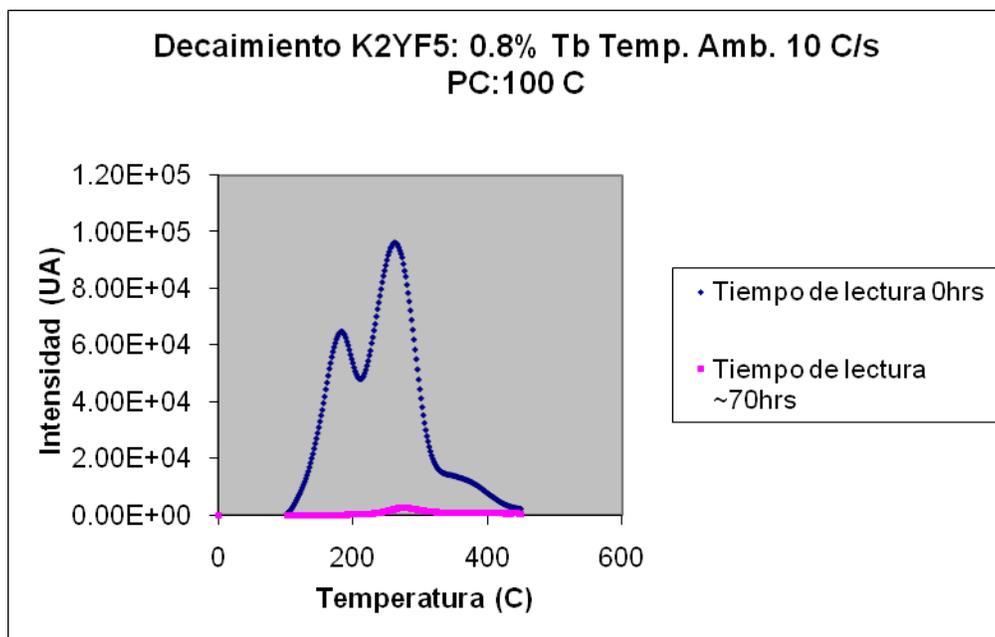


28.a. Curva de brillo del K_2YF_5 : 0.8 % Tb después de se irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y curva de decaimiento isotérmico.

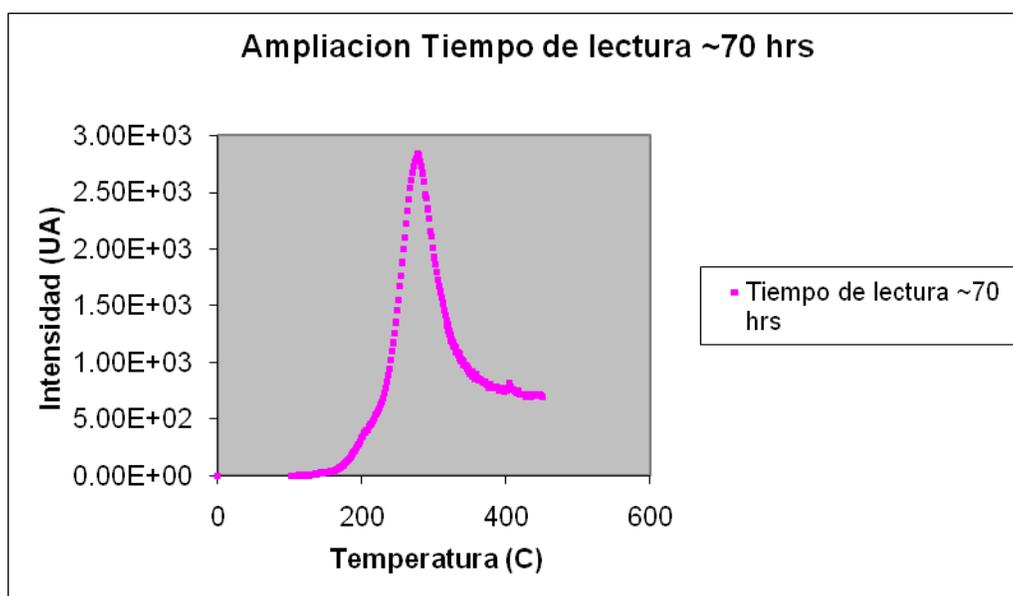


28.b. Curva de brillo del pico aislado después de un decaimiento isotérmico del K_2YF_5 : 0.8 % Tb después de se irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$

En las figuras 29.a se muestra nuevamente las curvas de brillo del material TL $K_2YF_5: 0.8\% Tb$, después de ser irradiado con 236.5726 mGy de una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$, y la curva de decaimiento isotérmico a temperatura ambiente después de 70 hrs. En la figura 29.b se observa la ampliación de la curva de decaimiento isotérmico.



29.a. Curva de brillo del $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y la curva de decaimiento isotérmico.



29.b. Curva de brillo del pico aislado después de un decaimiento isotérmico del $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$

ESTIMULACION DE TRAMPAS A 100 °C.

El tratamiento termal de estimulación de trampas no es un método de decaimiento isotérmico como tal (pues el material es “leído” previamente a su horneado) pero se incluye dentro de éste, ya que durante la etapa de la estimulación de la liberación de los portadores de carga atrapados en los estados atrapantes, el material TL es horneado durante un tiempo específico a una temperatura mayor a la ambiente (En este caso se sugiere una temperatura de 100 °C) y después “leído” nuevamente, para observar el resultado de la estimulación.

En las figuras 30.a, 31.a, 32.a y 33.a se observa las curvas de brillo del material TL $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser irradiado con 236.5726 mGy de una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y su curva de estimulación de trampas a una temperatura de 100 °C, en diferentes instantes de tiempo. En las figuras 30.b, 31.b, 32.b y 33.b se observan las curvas de brillo del material ya estimulado, en diferentes instantes de tiempo.

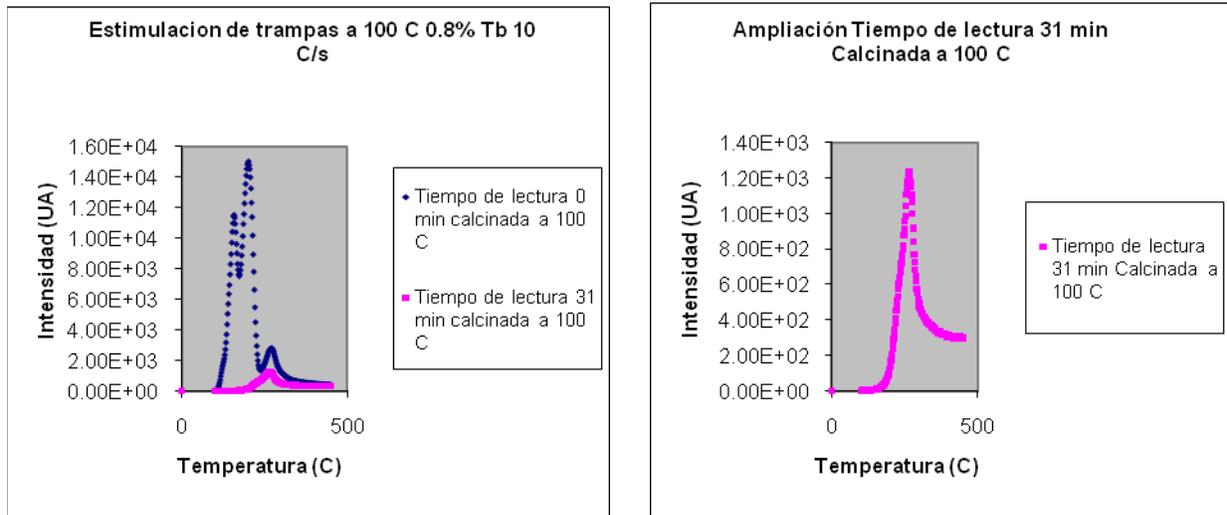


Fig. 30.a y b. Muestran las curvas de brillo del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser irradiado con un fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y su curva de estimulación de trampas a 100 °C, durante 31 min.

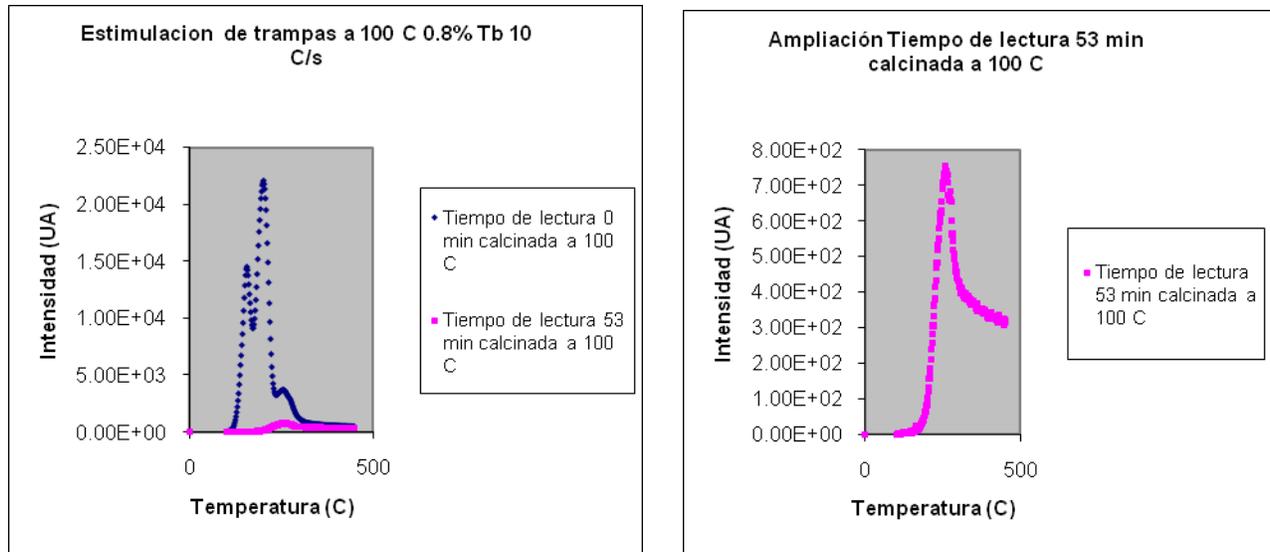


Fig. 31a y b. Muestran las curvas de brillo del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser irradiado con un fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y su curva de estimulación de trampas a 100 °C, durante 53 min.

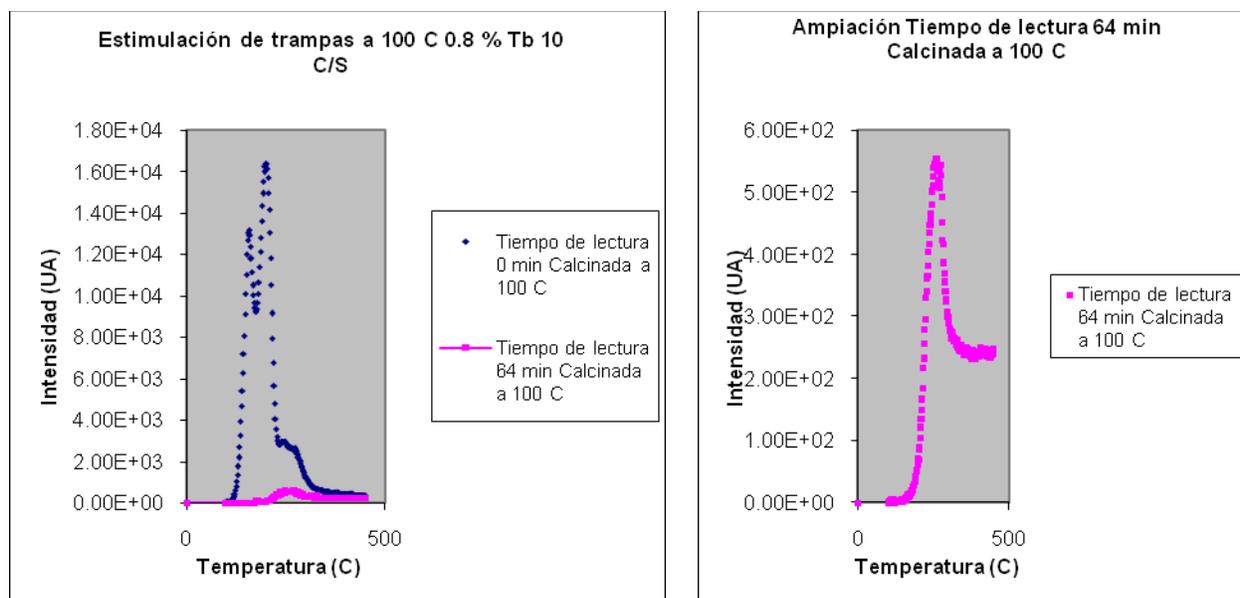


Fig. 32.a y b. Muestran las curvas de brillo del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser irradiado con un fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y su curva de estimulación de trampas a $100\text{ }^\circ\text{C}$, durante 64 min.

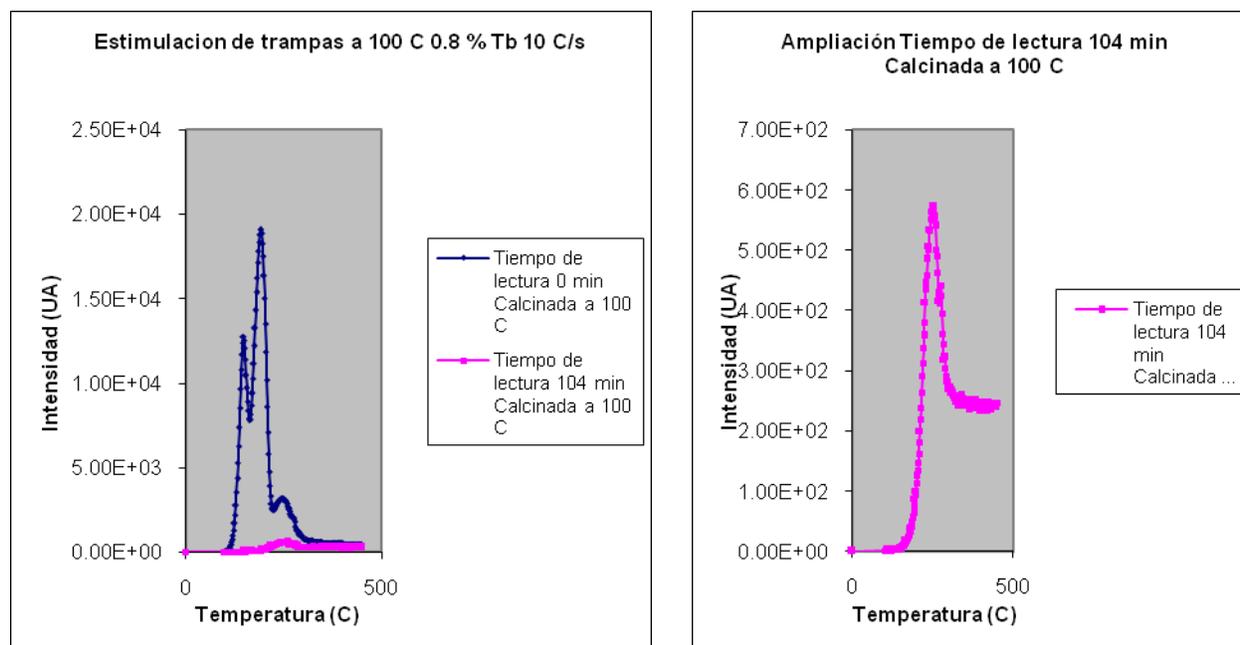


Fig. 33.a y b. Muestran las curvas de brillo del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser irradiado con un fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y su curva de estimulación de trampas a $100\text{ }^\circ\text{C}$, durante 104 min.

Material	Tratamiento Térmico	T _m (°K)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	τ (°K)	δ(°K)	ω(°K)	μ _g (adim)	γ(adim)	10.52- μ _g l -1 0.42- μ _g l	b	Método
528#1	Desv. T=298.1 °K	546.4	511.4	570.6	34.9	24.2	59.2	0.4	0.7	0.1	1.1	FP & II
528#1	S/T	461.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
528#1	S/T	521.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528#1	S/T	595.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528#2	Desv. T=298.1 °K	551.6	521.1	586.8	30.6	35.2	65.7	0.5	1.2	-0.1	2.3	FP & II
528#2	S/T	433.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
528#2	S/T	491.9	439.6	523.3	52.3	31.4	83.7	0.4	0.6	0.1	0.7	FP
528#2	S/T	568.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal31min	Calcinada 31 min. T=373.1 °K	539.4	504.4	562.2	35.0	22.7	57.7	0.4	0.6	0.1	0.9	FP & II
528cal31min	S/T	430.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
531cal31min	S/T	474.6	444.6	489.2	30.1	14.5	44.6	0.3	0.5	0.1	0.3	FP
531cal31min	S/T	544.6	513.2	564.6	31.5	19.9	51.4	0.4	0.6	0.1	0.9	FP
528cal51min	Calcinada 51 min. T=373.1 °K	532.4	497.4	611.2	35.0	78.7	113.7	0.7	2.3	-0.1	3.5	FP
528cal51min	S/T	429.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
528cal51min	S/T	474.6	453.8	490.2	20.8	15.5	36.4	0.4	0.7	0.1	1.3	FP
528cal51min	S/T	528.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal64min	Calcinada 64 min T=373.1 °K	534.2	495.6	583.2	38.5	49.0	87.5	0.6	1.3	-0.1	2.5	FP
528cal64min	S/T	430.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
528cal64min	S/T	474.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal64min	S/T	542.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal104min	Calcinada 104min T=298.15 °K	523.6	491.7	565.2	31.9	41.6	73.5	0.6	1.3	-0.1	2.6	FP
528cal104min	S/T	420.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
528cal104min	S/T	465.9	442.9	482.4	22.9	16.5	39.5	0.4	0.7	0.1	1.2	FP
528cal104min	S/T	516.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla2. Se presentan los parámetros obtenidos para la temperatura del máximo de emisión T_m, las temperaturas para la emisión media T₁ y T₂ necesarias para calcular la desviación izquierda y derecha τ, δ, y el ancho medio ω de un pico TL del material K₂YF₅: 0.8% Tb para aplicar el método de la forma del pico. FP: Método de la forma del pico; II: método de la elevación inicial.

DECAIMIENTO ISOTERMICO EN DIFERENTES INSTANTES.

Aunque el método de decaimiento isotérmico es también un tratamiento térmico como lo es la estimulación de trampas, se diferencia de éste por el procedimiento que se aplica al material TL. En el método de decaimiento isotérmico el material no es previamente “leído” a su horneado, ya que si se le realiza un monitoreo previo a la estimulación entonces se le está estimulando, es decir durante la etapa de “leído” se está estimulando la liberación de carga en los estados atrapantes por la lectura, así por esta razón no se le hace una lectura previa. Lo que se desea es que se “vacíen” los estados atrapantes por horneado a una temperatura específica (posterior a la irradiación) durante un tiempo específico, y después monitorearlos. Y además repetir el procedimiento varias veces a diferentes temperaturas de horneado.

En la figura 34, 35, 36 se muestran las curvas de brillo de decaimiento isotérmico del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ después de ser horneada a una temperatura ($373.1\text{ }^\circ K$, $398.1\text{ }^\circ K$ y $423.1\text{ }^\circ K$, respectivamente) durante tiempos específicos, y previamente irradiada con 236.5726 mGy de una fuente $^{90}Sr/^{90}Y$.

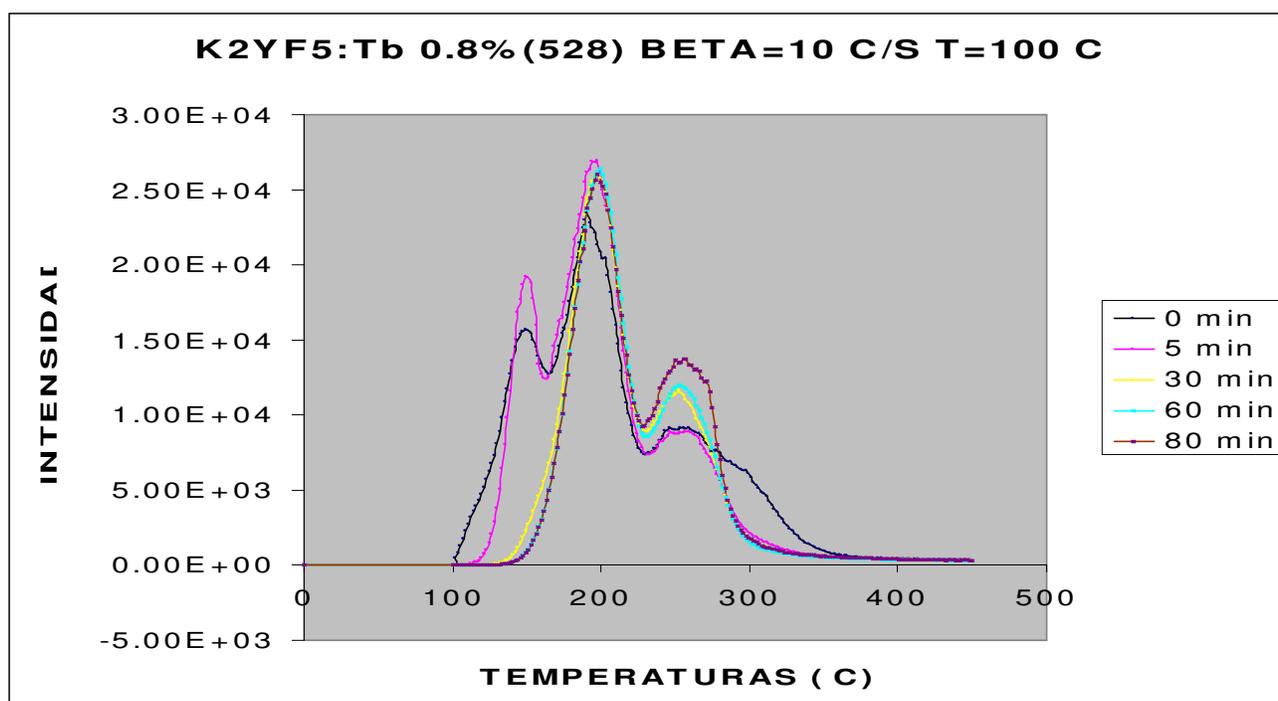


Fig. 34. Se observan las curvas de decaimiento isotérmico a $100\text{ }^\circ C$ del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$, en distintos instantes

t (s)	$I_{M\acute{a}x} (T_m=422.1\text{ }^\circ K)$	$I_{M\acute{a}x} (T_m=464.1\text{ }^\circ K)$	$I_{M\acute{a}x} (T_m=520.1\text{ }^\circ K)$
0	15693	23443	9134
18000	19237	26154	8902
108000	2271	24441	11292
216000	860	23638	11384
288000	807	23771	12963

Tabla 3. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ monitoreados en diferentes instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de $373.1\text{ }^\circ K$.

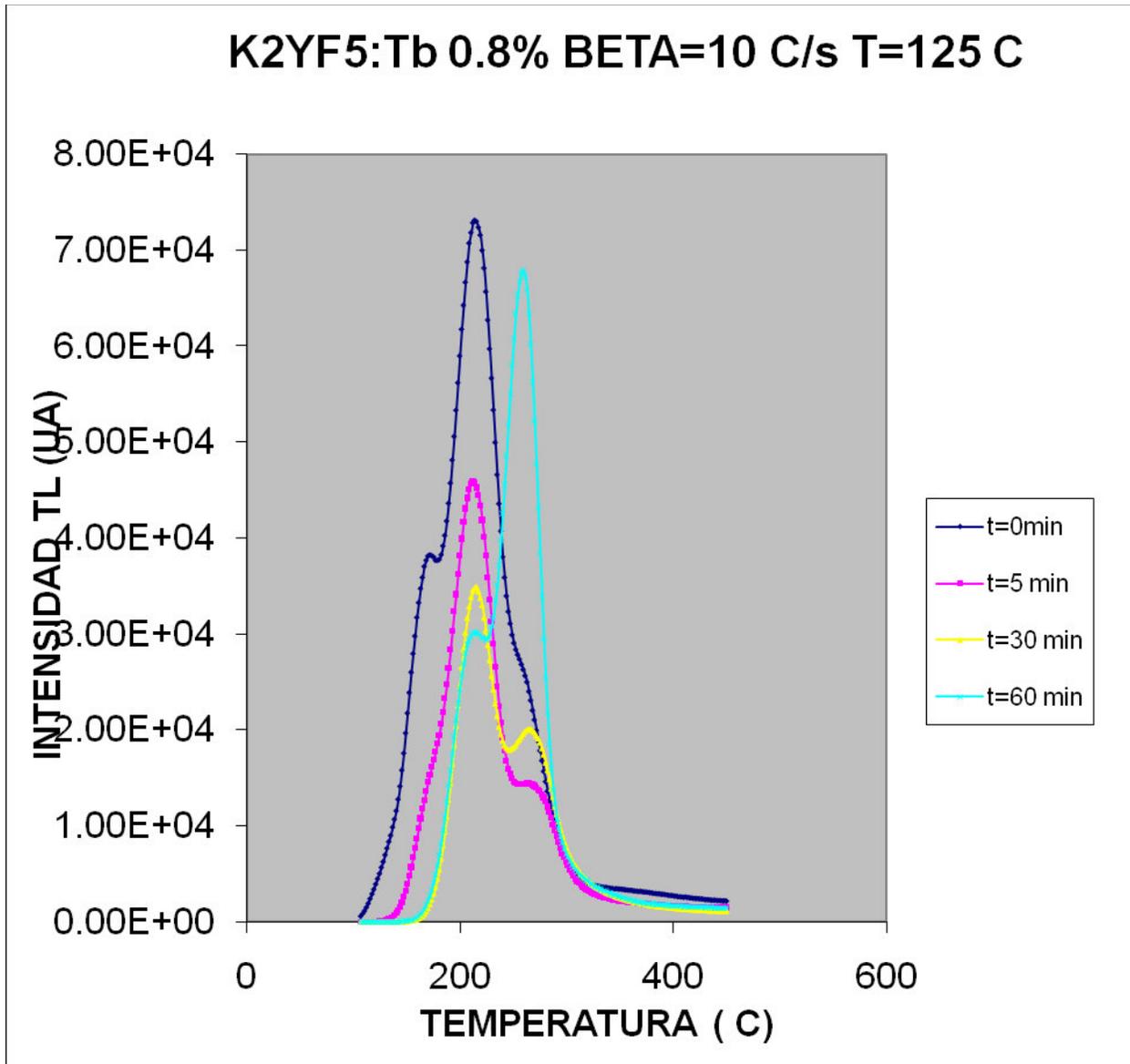


Fig. 35. Se observan las curvas de decaimiento isotérmico a 125 °C del material K₂YF₅: 0.8% Tb, en distintos instante.

t (s)	$I_{M\acute{a}x}(T_m=422.1\text{ }^\circ\text{K})$	$I_{M\acute{a}x}(T_m=464.1\text{ }^\circ\text{K})$	$I_{M\acute{a}x}(T_m=520.1\text{ }^\circ\text{K})$
0	19682	45721	31083
18000	3242	28345	15404
108000	53	14414	17949
216000	88	15862	55057

Tabla 4. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K₂YF₅: 0.8% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 125 °C.

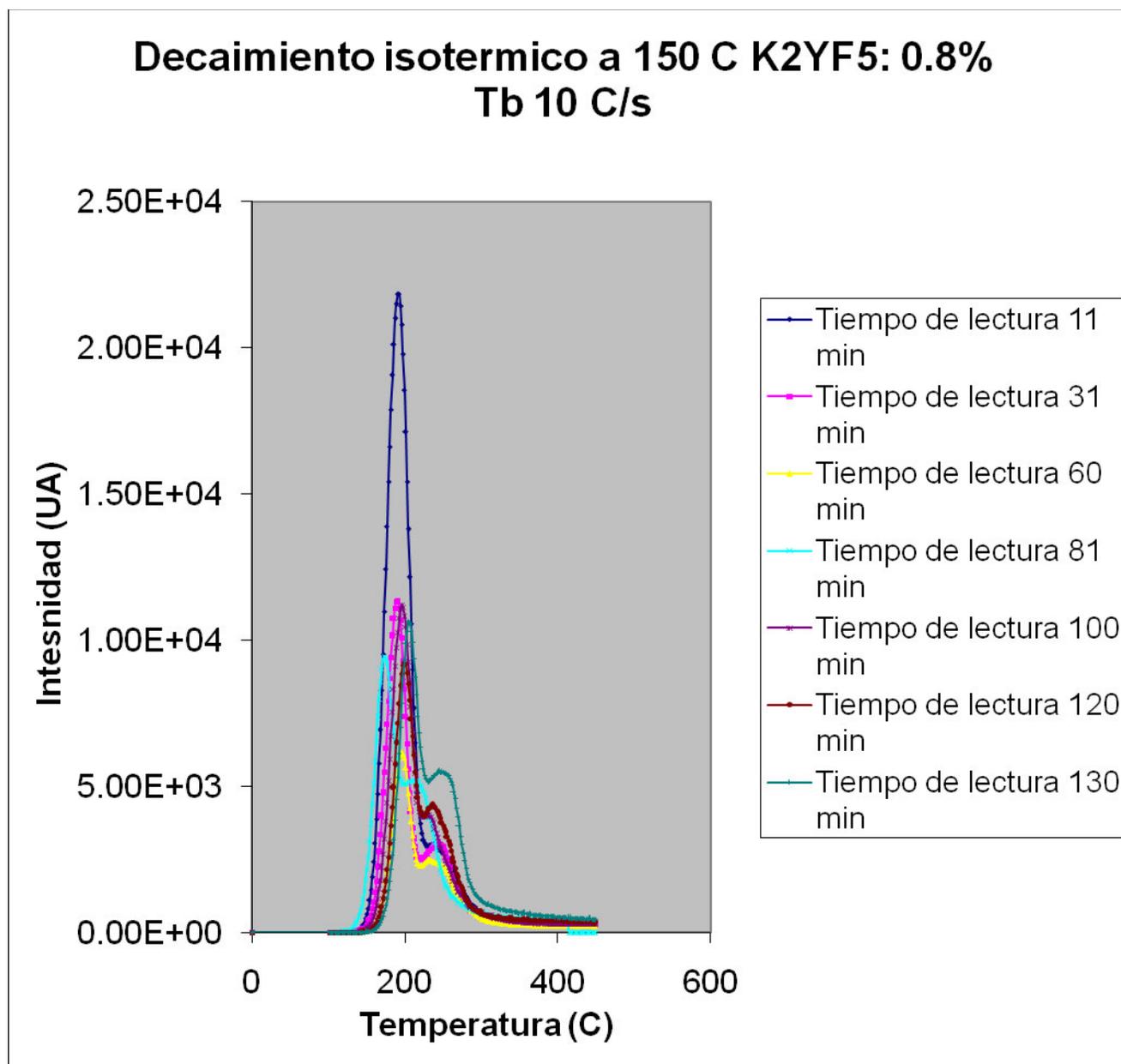


Fig. 36. Se observan las curvas de decaimiento isotérmico a 150 °C del material K₂YF₅: 0.8% Tb, en distintos instante.

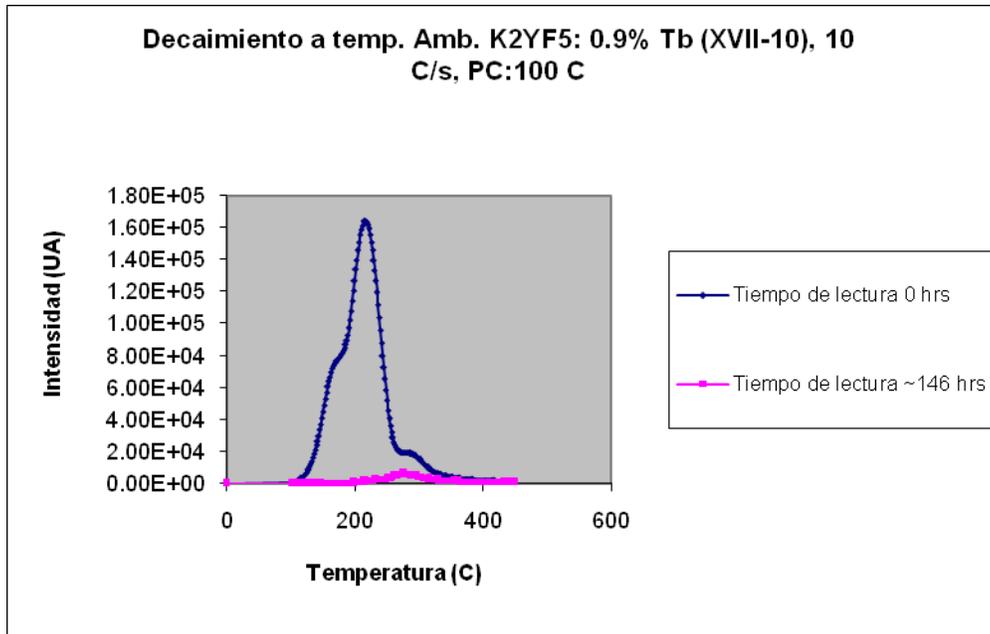
t (s)	I _{Máx} (T _m =422 °K)	I _{Máx} (T _m =464.1 °K)	I _{Máx} (T _m =520.1 °K)
39600	468	21848	2829
111600	184	11355	3024
216000	39	5685	2303
291600	1790	5665	2175
360000	93	10277	2910
432000	37	7172	3907
468000	17	5307	5487

Tabla 5. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K₂YF₅: 0.8% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 150 °C.

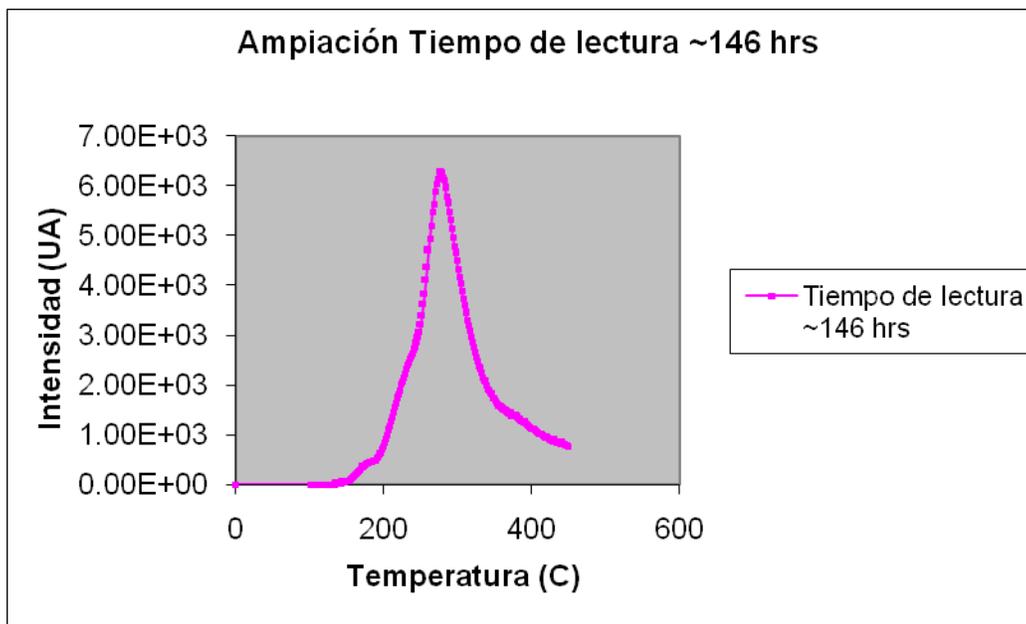
ii. K_2YF_5 : Tb 0.9 % (XVII-10).

DECAIMIENTO A TEMPERATURA AMBIENTE.

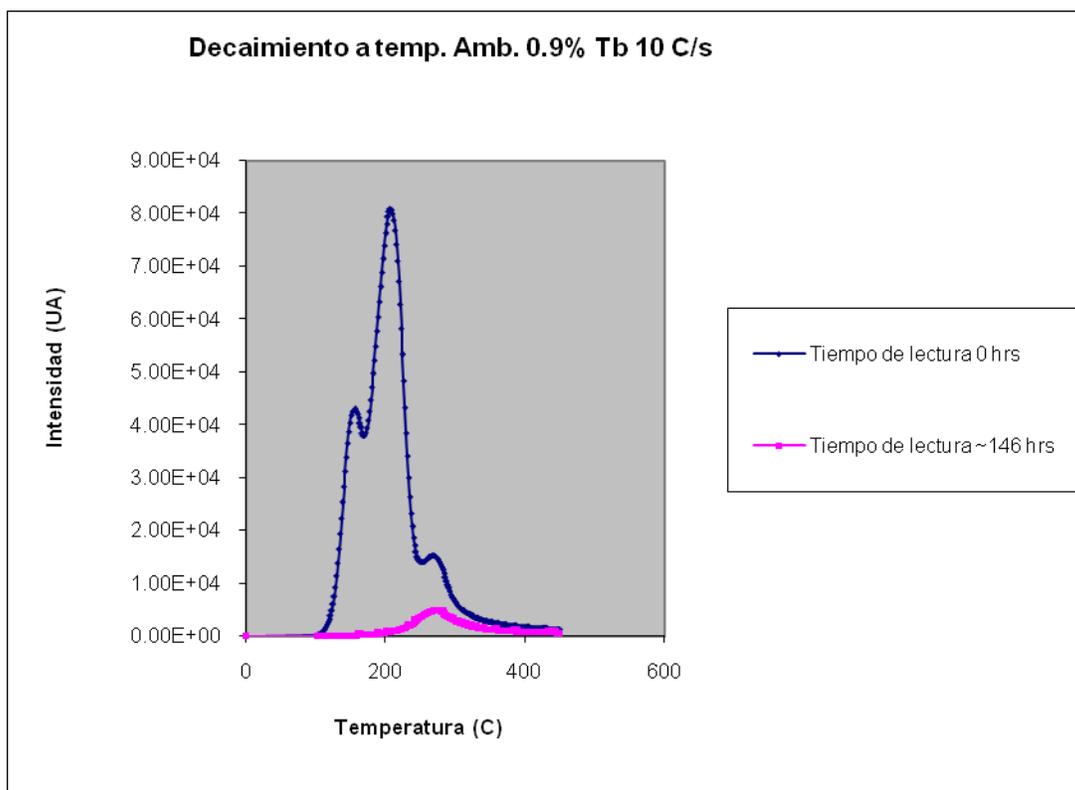
En la figura 37.a, 38.a y 39.a se muestra la curva de brillo del material TL K_2YF_5 : 0.9% Tb después de ser irradiado con 236.5726 mGy de una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$, además se observa también la curva de decaimiento isotérmico a temperatura ambiente después de 146 hrs. En la figura 37.b, 38.b y 39.b se observa la ampliación de la curva de decaimiento isotérmico del material TL K_2YF_5 : 0.8% Tb, observada en la figura respectiva.



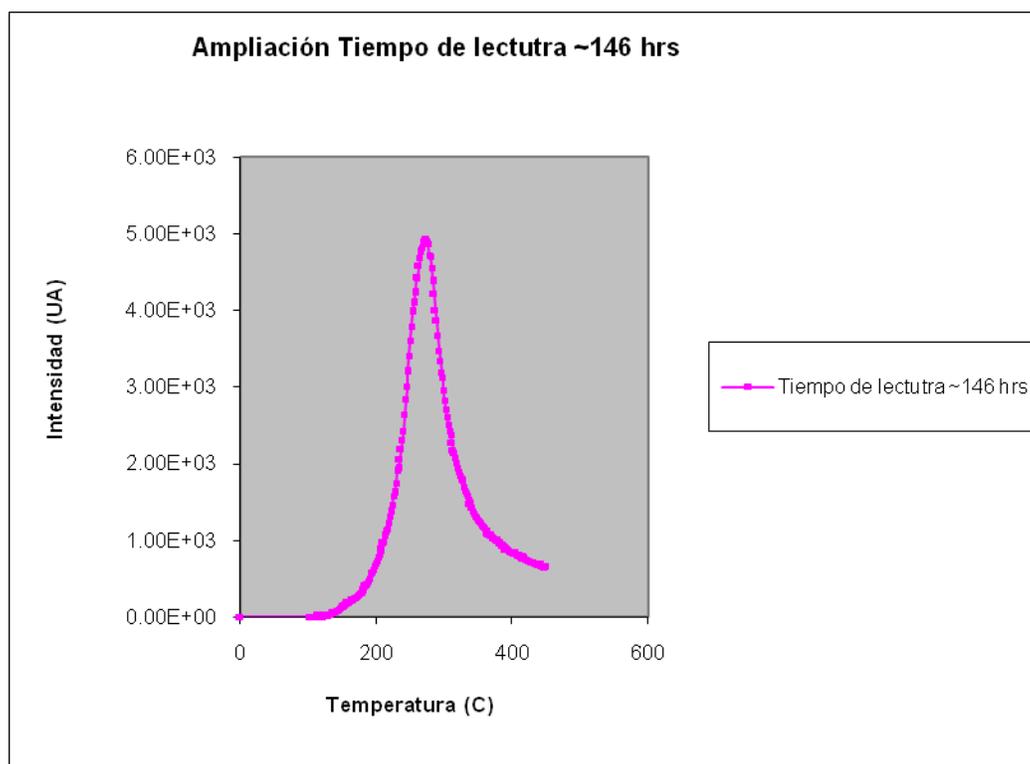
37.a. Curva de brillo del K_2YF_5 : 0.9 % Tb después de ser irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y curva de decaimiento isotérmico.



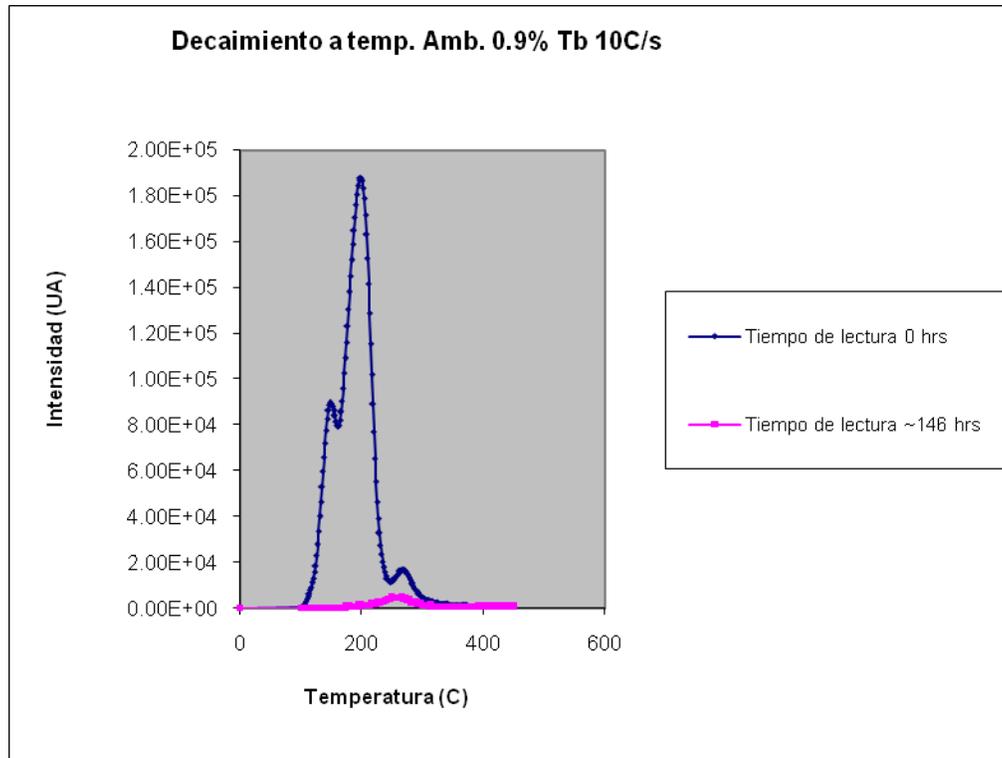
37.b. Curva de decaimiento isotérmico del K_2YF_5 : 0.9 % Tb después de ser irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y.



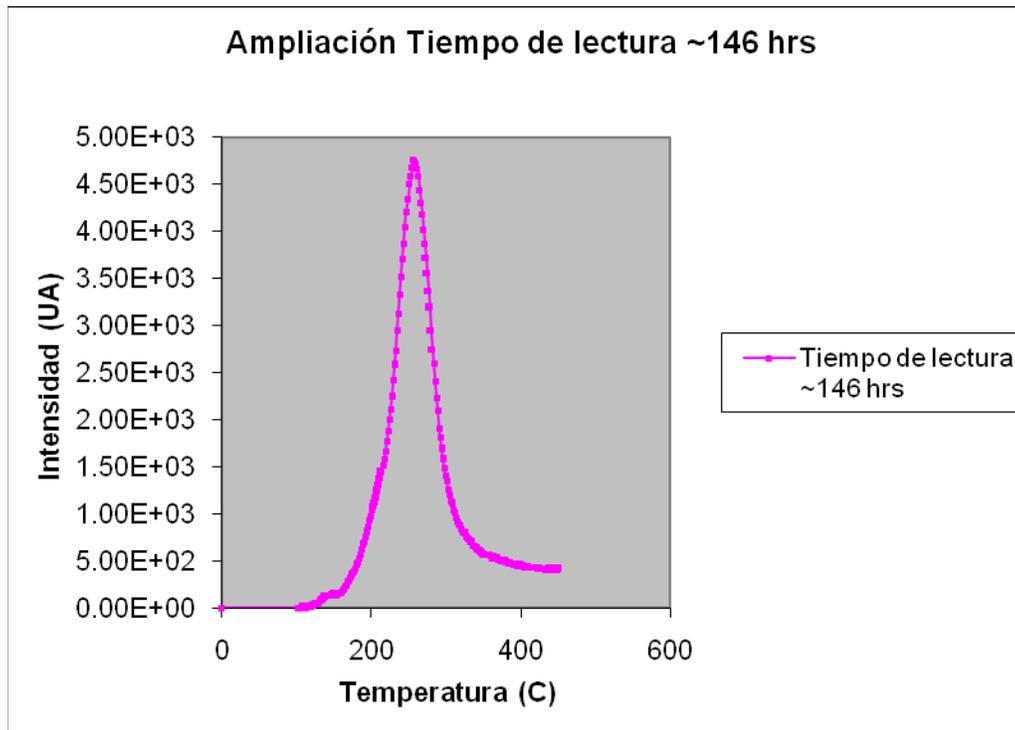
38.a. Curva de brillo del $K_2YF_5: 0.9\% Tb$ después de se irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y curva de decaimiento isotérmico.



38.b. Curva de decaimiento isotérmico del $K_2YF_5: 0.9\% Tb$ después de se irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y curva.



39.a. Curva de brillo del $K_2YF_5: 0.9\% Tb$ después de se irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y curva de decaimiento isotérmico.



39.b. Curva de decaimiento isotérmico del $K_2YF_5: 0.9\% Tb$ después de se irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$.

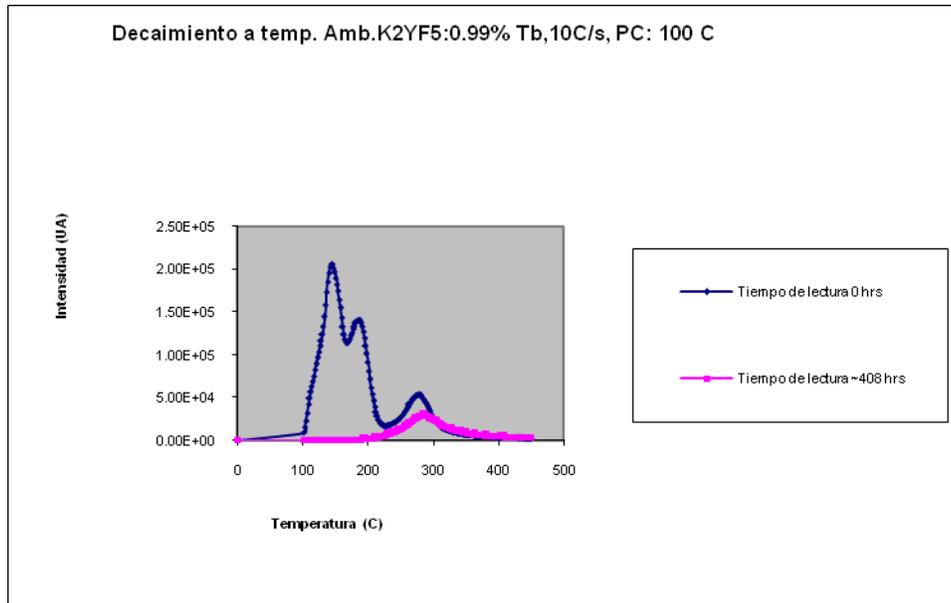
Material	Tratamiento Térmico	T_m (°K)	T_1 (°K)	T_2 (°K)	τ (°K)	δ (°K)	ω (°K)	μ_g (adim)	γ (adim)	$10.52 - \mu_{gl} - 0.42 - \mu_{gl}$	b	Método
XVII-10 #1	Desv. T=298.1 °K	549.9	522.1	590.2	27.8	40.3	68.1	0.6	1.4	-0.1	2.7	FP & II
XVII-10 #1	S/T	492.2	453.2	517.3	39.0	25.2	64.2	0.4	0.6	0.1	0.9	FP & II
XVII-10 #1	S/T	555.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
XVII-10 #2	Desv. T=298.1 °K	546.4	512.7	581.1	33.7	34.7	68.3	0.5	1.0	-0.07	2.1	FP & II
XVII-10 #2	S/T	430.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
XVII-10 #2	S/T	479.9	446.4	501.2	33.5	21.3	54.7	0.4	0.6	0.1	0.9	FP
XVII-10 #2	S/T	542.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
XVII-10 #3	Desv. T=298.1 °K	528.9	501.7	558.8	27.2	29.9	57.1	0.5	1.1	-0.1	2.2	FP & II
XVII-10 #3	S/T	422.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
XVII-10 #3	S/T	472.9	442.1	492.5	30.8	19.6	50.4	0.4	0.6	0.1	0.9	FP
XVII-10 #3	S/T	541.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla6. Se presentan los parámetros obtenidos para la temperatura del máximo de emisión T_m , las temperaturas para la emisión media T_1 y T_2 necesarias para calcular la desviación izquierda y derecha τ , δ , y el ancho medio ω de un pico TL del material $K_2YF_5: 0.9\% Tb$ para aplicar el método de la forma del pico. FP: Método de la forma del pico; II: método de la elevación inicial.

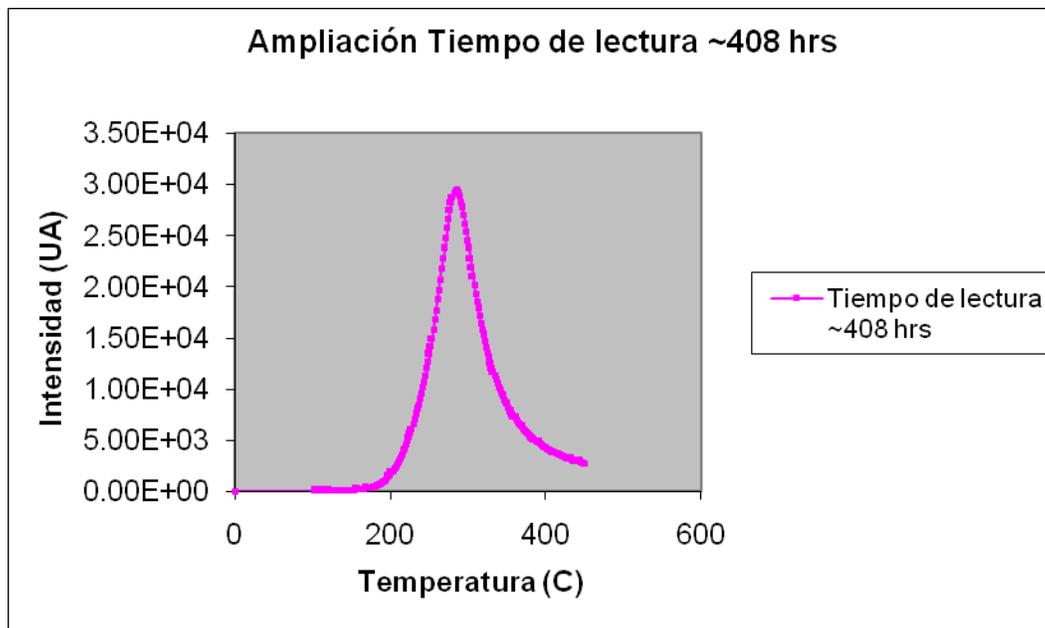
iii. $K_2YF_5: Tb$ 0.99% (85).

DECAIMIENTO A TEMPERATURA AMBIENTE.

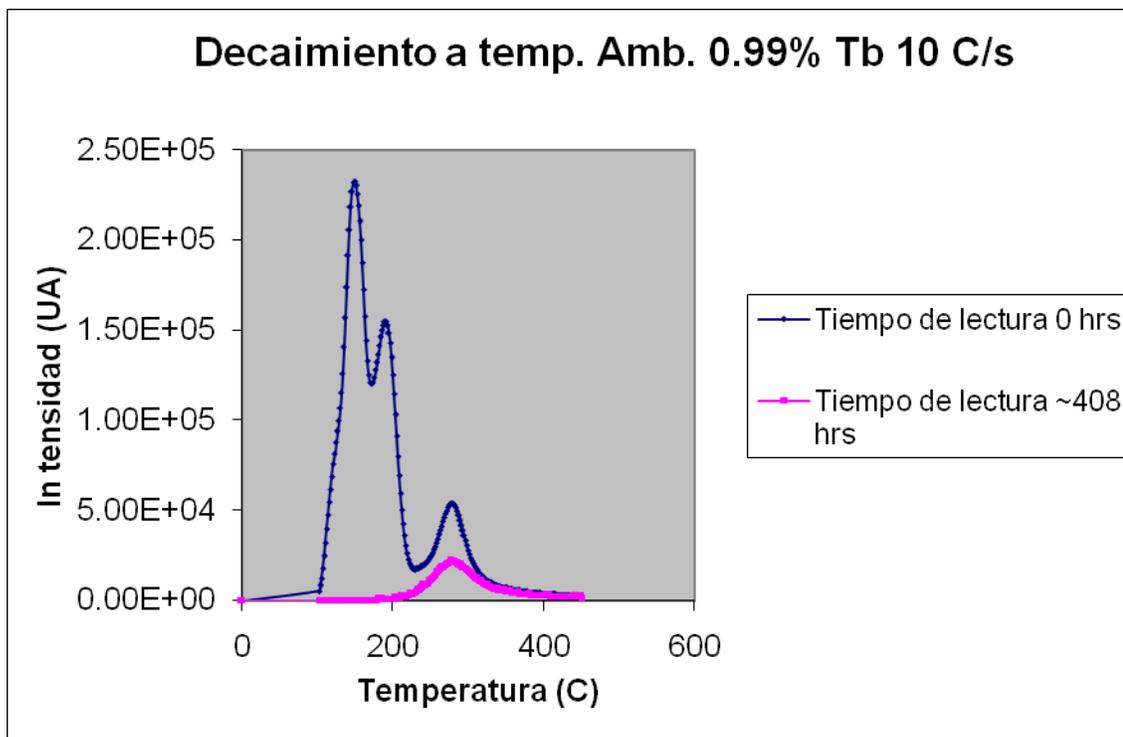
En la figura 40.a y 41.a se muestra la curva de brillo del material TL $K_2YF_5: 0.9\%$ Tb después de ser irradiado con 236.5726 mGy de una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$, además se observa también la curva de decaimiento isotérmico a temperatura ambiente después de 146 hrs. En la figura 40.b y 41.b se observa la ampliación de la curva de decaimiento isotérmico del material TL $K_2YF_5: 0.8\%$ Tb, observada en la figura respectiva.



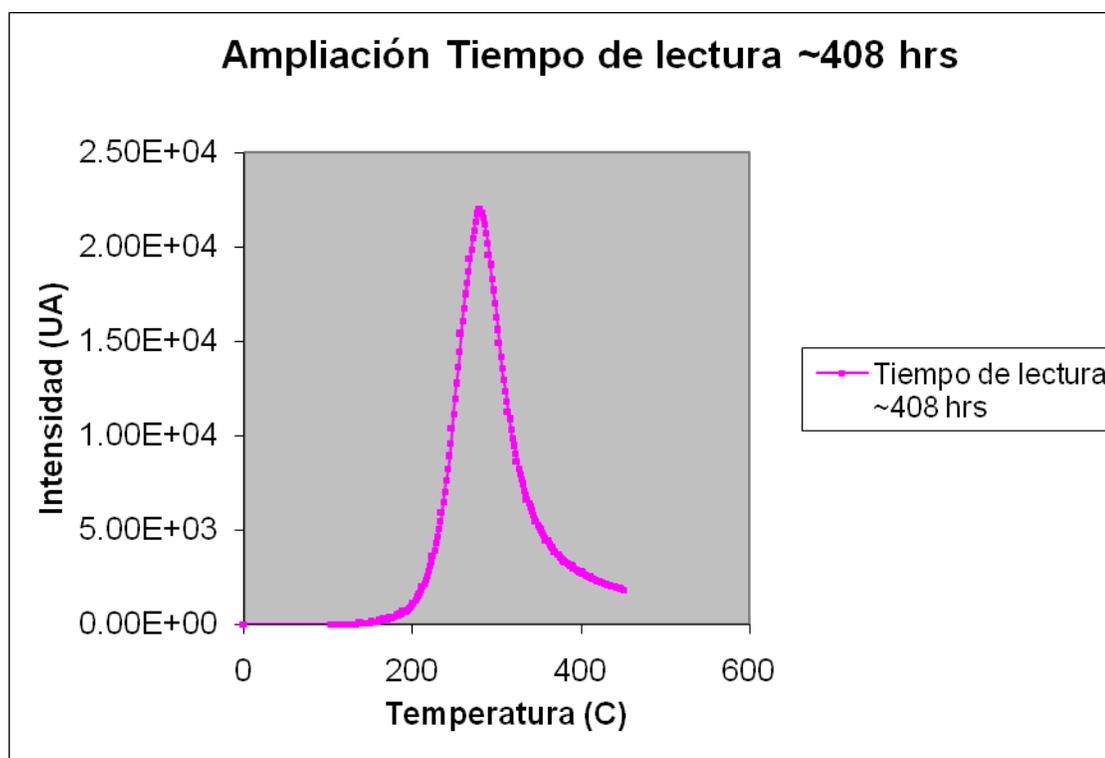
40.a. Curva de brillo del $K_2YF_5: 0.9\%$ Tb después de ser irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$ y curva de decaimiento isotérmico.



40.b. Curva de decaimiento isotérmico del $K_2YF_5: 0.9\%$ Tb después de ser irradiado por una fuente de $^{90}Sr/^{90}Y$.



41.a. Curva de brillo del K₂YF₅: 0.9 % Tb después de se irradiado por una fuente de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y y curva de decaimiento isotérmico.



41.b. Curva de decaimiento isotérmico del K₂YF₅: 0.9 % Tb después de se irradiado por una fuente de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y.

Material	Tratamiento Térmico	T _m (°K)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	τ (°K)	δ(°K)	ω(°K)	μ _g (adim)	γ(adim)	10.52- μ _g - 0.42- μ _g	b	Método
85 #1	Desv. T=298.1 °K	556.9	526.2	595.6	30.7	38.7	69.4	0.5	1.3	-0.1	2.5	FP & II
85 #1	S/T	416.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II
85 #1	S/T	458.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
85 #1	S/T	551.6	522.7	572.3	28.9	20.6	49.6	0.4	0.7	0.1	1.2	FP
85 #2	Desv. T=298.1 °K	553.4	522.1	589.5	31.3	36.1	67.4	0.5	1.2	-0.1	2.3	FP & II
85 #2	S/T	422.2	404.3	445.0	17.8	22.8	40.7	0.6	1.3	-0.1	2.5	FP & II
85 #2	S/T	462.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
85 #2	S/T	551.6	526.4	572.3	25.2	20.6	45.9	0.4	0.8	0.04	1.5	FP

Tabla7. Se presentan los parámetros obtenidos para la temperatura del máximo de emisión T_m, las temperaturas para la emisión media T₁ y T₂ necesarias para calcular la desviación izquierda y derecha τ, δ, y el ancho medio ω de un pico TL del material K₂YF₅: 0.99% Tb para aplicar el método de la forma del pico. FP: Método de la forma del pico; II: método de la elevación inicial.

DECAIMIENTO ISOTERMICO EN DIFERENTES INSTANTES.

En la figura 42, 43 se muestran las curvas de brillo de decaimiento isotérmico del material $K_2YF_5: 0.99\% \text{ Tb}$ después de ser horneada a una temperatura ($398.1\text{ }^\circ\text{K}$ y $423.1\text{ }^\circ\text{K}$, respectivamente) durante tiempos específicos, y previamente irradiada con 236.5726 mGy de una fuente $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

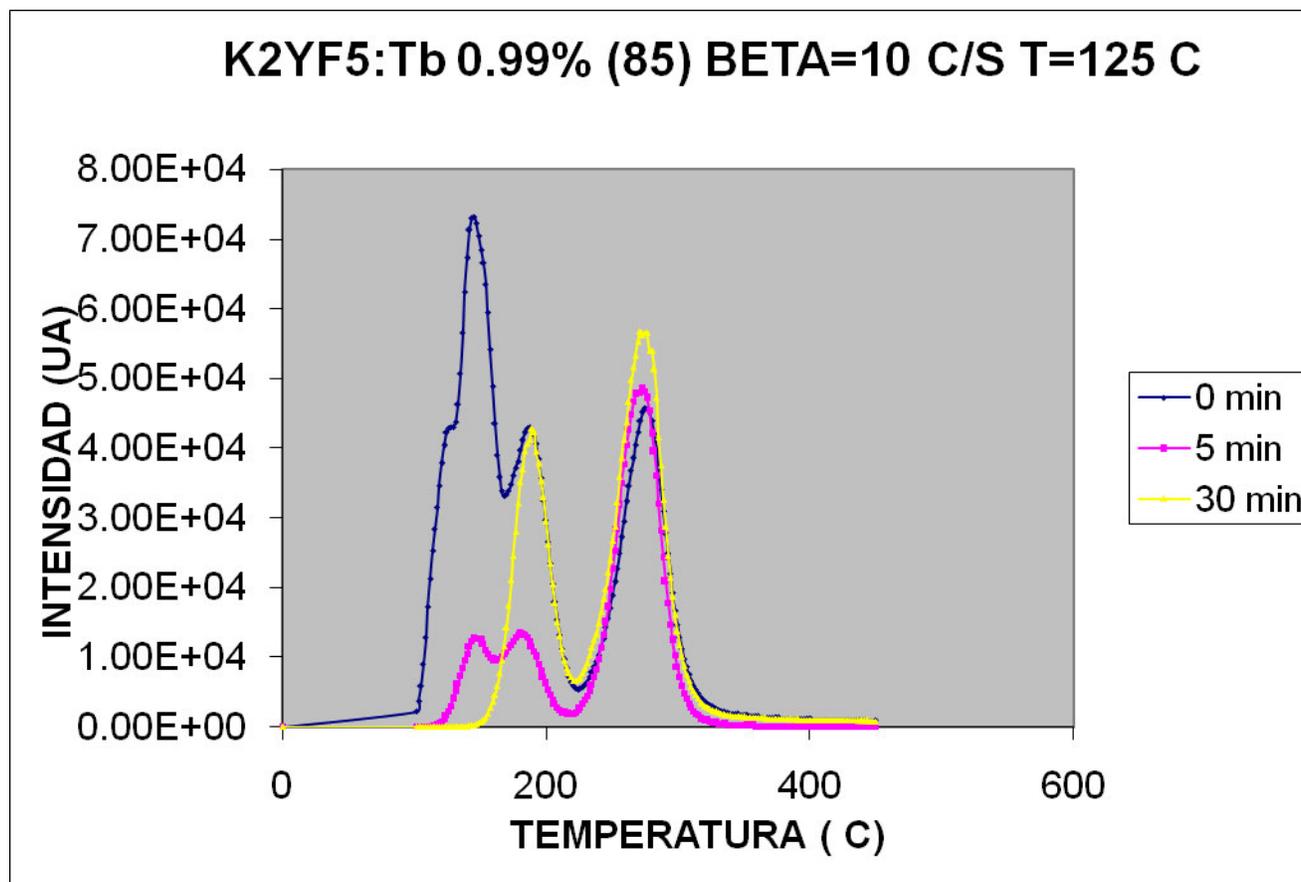


Fig.42. Se observan las curvas de decaimiento isotérmico a $125\text{ }^\circ\text{C}$ del material $K_2YF_5: 0.99\% \text{ Tb}$, en distintos instante.

t (s)	$I_{\text{Máx}} (T_m = 418.1\text{ }^\circ\text{K})$	$I_{\text{Máx}} (T_m = 460.1\text{ }^\circ\text{K})$	$I_{\text{Máx}} (T_m = 549.1\text{ }^\circ\text{K})$
0	73269	43005	45709
300	12600	12288	48202
1800	271	41141	56615

Tabla 8. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material $K_2YF_5: 0.99\% \text{ Tb}$ monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de $125\text{ }^\circ\text{C}$.

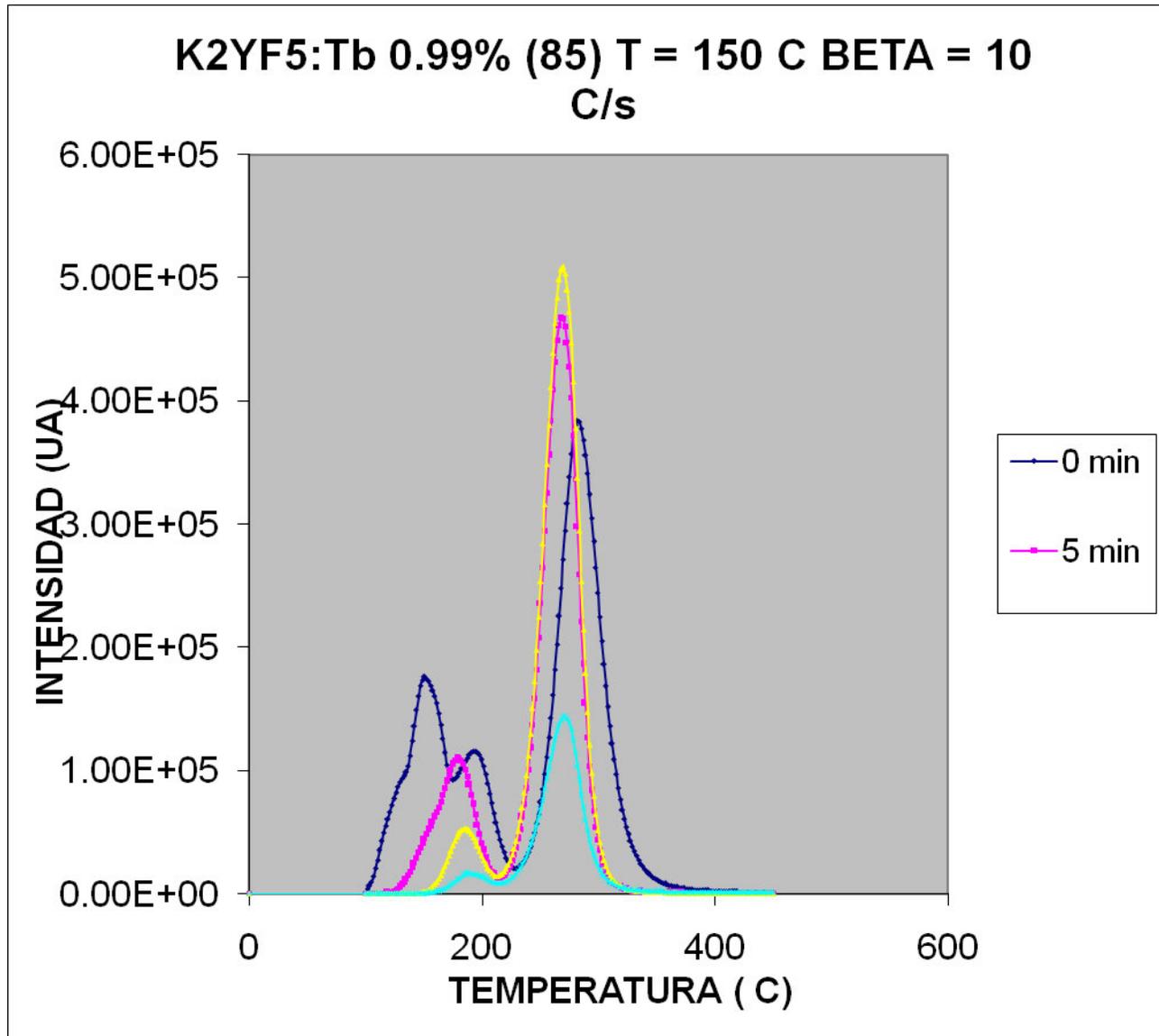


Fig.43. Se observan las curvas de decaimiento isotérmico a 150 °C del material K₂YF₅: 0.99% Tb, en distintos instante.

t (s)	I _{Máx} (T _m =418.1 °K)	I _{Máx} (T _m =460.1 °K)	I _{Máx} (T _m =549.1 °K)
0	160371	110611	357561
300	33629	95245	403128
1800	669	52548	447341
3600	246	16554	133433

Tabla 9. Se observan las intensidades máximas de los picos TL observados para el material K₂YF₅: 0.99% Tb monitoreados en diferente instantes de tiempo durante su desvanecimiento a una temperatura de 150 °C.

XI. ANALISIS.

1. Propiedades dosimétricas

a) Curvas de brillo.

Las observaciones de las curvas de brillo de referencia para los materiales TL K_2YF_5 : 0.8%, 0.9 % y 0.99 % se describen en la tabla siguiente:

Material TL	Número de picos	T_m Prom.(°K)	σ (°K)	I_{max} Prom.(UA)	$\sigma(x10^3)$ UA)	Fig. Ref.
K_2YF_5 : 0.8% Tb	3	434.4	14.2	27 772.5	23.4	21.a
		483.9	20.4	40 883.5	35.9	
		543.7	21.2	5071.5	3.7	
K_2YF_5 : 0.9% Tb	3	426.5	6.2	65 902.5	32.9	21.b
		481.6	9.7	144 015.7	56.2	
		544.1	8.9	16 622	2.3	
K_2YF_5 : 0.99% Tb	3	419.5	3.7	218 951.5	18.9	21.c
		460.6	2.5	147 585.5	9.8	
		553.4	2.5	53 738.5	0.1	

Tabla 10. Descripción de los picos para las curvas de brillo TL de los materiales K_2YF_5 : 0.8%, 0.9%, 0.99% Tb.

Los tres materiales TL muestran tres picos prominentes en sus curvas de brillo.

El K_2YF_5 : 0.8 % Tb tiene su pico de mayor respuesta TL en $T = 483.9$ °K, se observan también dos picos mas, en temperaturas de 4334.4 °K y 543.7 °K, siendo este ultimo el de mayor de tiempo de desvanecimiento, pues fue aislado después de aproximadamente 70 hrs. A temperatura ambiente.

Para el K_2YF_5 : 0.9 % Tb el pico de mayor respuesta TL se encuentra en $T = 481.6$ °K, se observa que este pico presenta una temperatura de emisión similar a la del pico de mayor respuestas TL del material dopado con 0.8% Tb. Se encuentran también dos picos en temperaturas de 426.5 °K y 544.1 °K , se observa nuevamente que la temperatura de estimulación es casi coincidente con la reportada para el material K_2YF_5 : 0.8 % Tb. Aunque las temperaturas de estimulación para los materiales dopados con 0.8% Tb y 0.9% Tb son aparentemente las mismas se puede ver que su respuestas TL son diferentes, ya que la registrada para los picos del material dopado con 0.9% Tb es mayor comparada con la del K_2YF_5 : 0.8 % Tb.

Nuevamente el pico de mayor tiempo de vida media es el ubicado en 544.1 °K, ya que se aisló después de casi 146 hrs. a temperatura ambiente.

El material K_2YF_5 : 0.99 % Tb presenta tres picos TL en las siguientes temperaturas: 419.5 °K , 460.6 °K y 553.4 °K, donde el pico de mayor respuesta TL es el ubicado en 419.5 °K. Se observa que las posiciones de los picos para este material son similares a la obtenida para los otros materiales con diferente dopaje, aunque presentan una mayor respuesta TL. El pico en 553.4 °K se puede tomar como el de mayor tiempo de desvanecimiento fue aislado después de 408 hrs.

Se observa en general que el material K_2YF_5 presenta tres picos TL observables en la curva de brillo ubicados alrededor de 426.8 °K, 475.4 °K y 547.1 °K., donde a menor dopaje de Tb el primer y el

segundo pico se encuentra a una temperatura mayor que los picos correspondientes de mayor dopaje, mientras al aumento del dopaje los picos empieza a moverse hacia temperaturas menores. Mientras el tercer pico a menor dopaje se encuentra en temperaturas menores comparativamente con los de mayor dopaje, además al aumento del dopaje este pico se mueve hacia temperaturas mayores.

Se observa en general que la respuesta TL aumenta con el dopaje del material K_2YF_5 . Además el tiempo de aislamiento del pico de ubicado en la temperatura mas alta (tercer pico) aumenta conforme se aumenta el dopaje.

b) Respuesta TL en función dosis absorbida.

Durante el tratamiento térmico conocido como decaimiento isotérmico para los materiales K_2YF_5 : 0.8 % y 0.99 % Tb se observo un comportamiento atípico en las curvas de brillo TL de los materiales, siendo este algo inesperado dado que durante el monitoreo de las trampas a diferentes instantes, por consideración de un modelo de un único estado atrapante y un solo estado de recombinación, para cada trampa pensándolas independientemente (no se considera el reatrapamiento, es decir primer orden cinético. Modelo de Randall y Wilkins) se debería observar que el pico en la curva de brillo de un estado atrapante “definido” se desvanecería conforme mas tiempo hubiese permanecido en el horno para su decaimiento isotérmico, pero al revisar las figuras 34, 35 y 36 para K_2YF_5 : 0.8 % Tb y 42 y 43 para K_2YF_5 : 0.99 % Tb este comportamiento no se observa totalmente (véase tablas 3, 4, 5, 8 y 9), lo que indicaría la posible existencia de un reatrapamiento entre las trampas involucradas. Por lo que de acuerdo al modelo de McKeever y Chen la respuesta a la dosis absorbida mas comúnmente es la sublineal (casi lineal), pero para propósitos prácticos se requiere una respuesta lineal. En muchos materiales o intervalos de dosis absorbida, se pueden presentar diferentes grados de no linealidad, la cual se puede clasificar por los efectos de no linealidad como sublineal, súper lineal (el intervalo de dosis donde la no linealidad aparece) y supra lineal (efecto de la radiación misma). Se puede discutir también la no linealidad por los modelos relacionados a los procesos realizados durante la etapa de excitación o los que ocurren durante la fase de calentamiento para diferenciar entre las no linealidades asociadas a estas etapas de la TL.

Cameron y Zimmerman²⁰ reportaron un crecimiento no lineal como función de la dosis β ó γ absorbida en LiF, reportaron la existencia de supra linealidad cuyo comportamiento observado es de respuesta lineal inicial sobre la dosis, seguida de un intervalo “más lineal” conforme se aproxima a la saturación. En el mismo periodo Halperin y Chen²¹ reportaron súper linealidad para semiconductores de diamante (Tipo IIb) irradiados con UV (225 nm), definiendo ellos la súper linealidad como resultado de graficar en una escala Log-Log la intensidad máxima como función de la dosis, si la pendiente de la recta obtenida es más grande que la unidad se presenta súper linealidad. Así que Halperin y Chen²¹ asumieron que $I_{max} = a D^k$, donde I_{max} es la intensidad máxima TL y D es la dosis absorbida. Ellos mismos explican que la súper linealidad observada viene a ser el resultado de una transición multiestado de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción.

Chen y McKeever²² Sugieren el uso de los términos superlinealidad y supra linealidad para describir dos relacionados pero no idénticas propiedades de la curva de brillo.

Rodine y Land²³ Estudiaron la excitación TL por luz UV de cristales de ThO_2 y encontraron una respuesta cuadrática a la dosis absorbida de alguno de los picos. Su descubrimiento y explicación cualitativa fue la base para la teoría de la competición entre trampas durante el calentamiento desarrollado por Chen y McKeever.

Como una primera explicación considere que la curva de brillo consiste de una serie de picos TL, así que el área total bajo la cual crece linealmente con la dosis absorbida (ó de excitación). Si en un cierto intervalo de dosis, la intensidad de uno o mas picos comienza acercarse a la saturación, la linealidad del área total media que es al menos uno de los otros picos puede crecer mas rápidamente, que una línea. Aquí la súper linealidad de alguno de los picos depende de los otros, los cuales crecen sublinealmente. Este concepto puede ser extendido a casos en los cuales algunos de los picos son no visibles, por lo que se presentan menos transiciones radiactivas u otros efectos no medibles, debido a las limitaciones muchas veces del equipo utilizado. En esta especie de superlinealidad, idealmente se asume una situación en la cual están directamente involucrados solo una trampa y un centro recombinatorio en la creación de un pico TL, ahora si S denota el área bajo el pico TL (ó la máxima intensidad TL), se espera que $S = \min(n_0, m_0)$ ya que cuando el pico se encuentra en su máxima intensidad o el pico esta en su punto de saturación entonces el numero de centro m es la mas baja y $S \propto m_0$, o bien cuando el pico esta terminándose entonces el numero de trampas n es la mas baja por que las trampas llenas se están agotando y $S \propto n_0$, así que como se tiene $S \propto D$ entonces $n_0 \propto D$ ó $m_0 \propto D$, y como $I_m \propto S$ por tanto $I_m \propto D$. Aunque esta situación cambia mucho en presencia de mas estados atrapantes.

Tomando el esquema de un centro de recombinación y dos estados atrapantes (es siguiente mas sencillo), con limitantes en las transiciones durante el calentamiento, como se muestra en la figura 44. Considérese nuevamente $S \propto (n_0, m_0)$. Ahora considere que el numero de estados atrapante n es mayor que el numero de estados de recombinación m en el punto de saturación del pico TL , en este punto al ser estimulado durante la etapa de calentamiento entonces se espera que los electrones en los estados atrapantes sean liberados y pasen al estado recombinatorio, pero algunos electrones son atrapados en el competidor (el otro estado atrapante) mas que los estados recombinatorios. Así cuando el pico se desvanece entonces n_0 se ha agotado mientras algunos hoyos permanecen en el centro recombinatorio, por tanto $S \propto n_0$ donde se asume que la dependencia es lineal respecto de la dosis absorbida. Además, si se consideran los electrones en la banda de conducción durante el calentamiento, ellos se distribuirán tal que algunos se recombinan con centros m y otros van al competidor.

Si la concentración de competidores vacíos $N_2 - n_2$ no depende de la dosis inicial, entonces una mayor cantidad de recombinaciones en los centros se presentaran, y si m_0 es proporcional a la dosis, entonces se asegura que el área bajo un pico esta dada por $S \propto n_0 m_0$ y por tanto $S \propto D^2$.

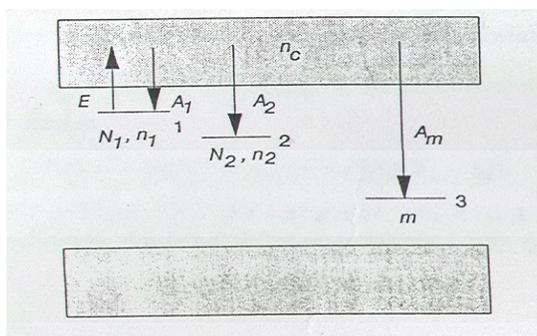


Fig. 44. Niveles de energía involucrados en la competición durante la etapa de calentamiento, m es la concentración de hoyos en los centros de recombinación; N_1, N_2 son las concentraciones de trampas TL activas, trampas competidoras, respectivamente; n_1 y n_2 son las concentraciones de electrones en esas trampas, respectivamente; A_1, A_2 son las probabilidades de atrapamiento en los niveles 1 y 2, respectivamente; A_m es la probabilidad de recombinación; n_c es la concentración de electrones libres en la banda de conducción.

Así pues en base al comportamiento de las curvas de brillo para el método de decaimiento isotérmico se observa un fuerte reatrapamiento de los electrones liberados durante la etapa de calentamiento es decir una competición entre trampas, por lo que se espera de acuerdo a la teoría de la competición

entre trampas desarrollada por Chen y McKeever una respuesta no lineal, específicamente polinómica de orden dos, para la dosis absorbida por los materiales, por lo que en la siguiente tabla se muestran los resultados generales de la respuesta TL en función de la dosis absorbida.

Material	$T_m (^{\circ}\text{K})$	Respuesta lineal	R^2	Respuesta Polinómica	R^2
K_2YF_5 : 0.8 % Tb	434.4	$111.71x + 788.11$	0.9998	$0.0006x^2 + 110.9x + 882.77$	0.9998
	483.9	$129.88x + 3182.1$	0.9946	$-0.014x^2 + 150.12x + 819.54$	0.9959
	543.7	$46.498x - 454.44$	0.9992	$0.0023x^2 + 43.232x - 73.177$	0.9995
K_2YF_5 : 0.99 % Tb	419.5	$465.9x - 21008$	0.9746	$0.2163x^2 + 152.37x + 15592$	0.998
	460.6	$280.35x - 13437$	0.9751	$0.1283x^2 + 94.423x + 8267.3$	0.9979
	553.4	$1428.3x - 34997$	0.9889	$0.3999x^2 + 848.65x + 32671$	0.9976

Tabla 11. Respuesta lineal y polinómica de orden dos para los picos observados de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

De esta tabla se deduce lo siguiente:

- ✓ En el material K_2YF_5 : 0.8 % Tb se observa que los coeficientes de correlación cuadráticos para los picos observados entre el ajuste a una respuesta lineal y una polinómica de orden dos, no presentan una mejora significativa del lineal al polinómico, por lo que prácticamente se puede considerar que la respuesta a la dosis absorbida por los picos de este material es lineal hasta 1.5 Gy.
- ✓ Para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb se observan mejoras considerables en los coeficientes de correlación cuadráticos para los picos observados del ajuste lineal al polinómico de orden dos, lo que indicaría que la respuesta a la dosis absorbida es polinómica de orden dos (hasta 1.5 Gy), lo cual esta acorde con la teoría desarrollada para la competición entre trampas durante la etapa de calentamiento.
- ✓ Los picos del material K_2YF_5 : 0.99% Tb presenta un límite lineal para dosis menores a 60 mGy.
- ✓ Se observa que la competencia entre trampas no explica el comportamiento atípico de las curvas de brillo observadas por el método de decaimiento isotérmico para el material K_2YF_5 : 0.8% Tb.
- ✓ Aunque para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb la competencia entre trampas durante la etapa de calentamiento parece ajustarse bastante a lo que sucede en las curvas de brillo ya que las curvas de respuesta a la dosis absorbida muestran lo predicho por la teoría para competencia entre trampas durante la etapa de calentamiento desarrollada por Chen y McKeever.
- ✓ Se puede asumir para K_2YF_5 , que al aumentar el dopaje de la tierra rara Tb este presentara una mayor competencia entre trampas durante la etapa de calentamiento y será más visible en las curvas de brillo de este material.
- ✓ Para materiales K_2YF_5 con menor dopaje a 0.99% de Tb se requiere otra explicación para el comportamiento atípico de las curvas de brillo, aunque se observe una aparente “competencia entre trampas”, la cual no necesariamente lo sea. Para ello se requiere materiales K_2YF_5 con dopaje menor a 0.99%, un estudio detallado de la estructura de bandas de estos materiales, crecimiento de los materiales y los procesos microscópicos que se presentan durante la etapa de calentamiento del material.
- ✓ El material K_2YF_5 : 0.8% Tb se puede considerar un material dosimétrico para radiación beta, para dosis hasta 1.5 Gy.

c) **Sensibilidad entre materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.**

La sensibilidad $R(D)$ es el aumento o disminución a la respuesta a la dosis absorbida por un material, comparado con la respuesta de un material estándar, tal como el TLD-100, o bien entre dopajes de un mismo material, por lo que se compararan las respuestas del material K_2YF_5 : 0.8% Tb contra K_2YF_5 : 0.99% Tb, por pico. Aunque las posiciones de los picos de acuerdo a la tabla 10, para estos materiales

no son las mismas, se puede hacer una comparativa de respuestas a la dosis entre picos pues corresponden estadísticamente al mismo evento o trampa.

Para el primer pico del K_2YF_5 : 0.8% Tb ubicado en 434.4 °K y el de K_2YF_5 : 0.99% Tb ubicado en 419.5 °K se tiene la tabla 12 que resumen los resultados de sensibilidades por dosis.

Dosis (mGy)	$S(D)_{K_2YF_5: 0.8\% Tb}$	$S(D)_{K_2YF_5: 0.99\% Tb}$	$R(D) = \frac{S(D)_{K_2YF_5: 0.99\% Tb}}{S(D)_{K_2YF_5: 0.8\% Tb}}$
10.6	1755	6091	3.5
21.2	3105	8045	2.6
63.5	7695	38041	4.9
148.3	18805	41600	2.2
232.9	25291	84257	3.3
465.9	53832	127167	2.4
1122.5	125170	450873	3.6
1503.8	169337	738578	4.4

Tabla 12. Comparativo de la respuesta de la dosis absorbida para el primer pico de las curvas de brillo de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

Se observa que la sensibilidad para este pico aumenta en promedio 3.4 veces al aumentar el dopaje 0.19 % de terbio, con una desviación de 0.9.

Haciendo ahora una tabla para el segundo pico ubicado en 483.9 °K y 460.6 °K para los materiales dopados con 0.8% y 0.99% Tb, respectivamente.

Dosis (mGy)	$S(D)_{K_2YF_5: 0.8\% Tb}$	$S(D)_{K_2YF_5: 0.99\% Tb}$	$R(D) = \frac{S(D)_{K_2YF_5: 0.99\% Tb}}{S(D)_{K_2YF_5: 0.8\% Tb}}$
10.6	1361	3573	2.6
21.2	2342	4302	1.8
63.5	9644	19780	2.1
148.3	31464	22597	0.7
232.9	27555	51229	1.8
465.9	71275	78876	1.1
1122.5	149128	268360	1.8
1503.8	196194	444319	2.3

Tabla 13. Comparativo de la respuesta de la dosis absorbida para el segundo pico de las curvas de brillo de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

En el caso del segundo pico la sensibilidad aumenta 1.8 veces al aumentar 0.19 % Tb el dopaje, con desviación de 0.6. Ahora para el tercer pico ubicado en 543.7 °K y 553.4 °K para los materiales dopados con 0.85 y 0.99% Tb, respectivamente.

Dosis (mGy)	$S(D)_{K_2YF_5: 0.8\% Tb}$	$S(D)_{K_2YF_5: 0.99\% Tb}$	$R(D) = \frac{S(D)_{K_2YF_5: 0.99\% Tb}}{S(D)_{K_2YF_5: 0.8\% Tb}}$
10.6	520	25442	48.9
21.2	940	26452	28.1
63.5	2848	118454	41.6
148.3	6240	135794	21.8
232.9	9108	332895	36.5
465.9	21595	472281	21.9
1122.5	50848	1492259	29.3
1503.8	70208	2213939	31.5

Tabla 14. Comparativo de la respuesta de la dosis absorbida para el tercer pico de las curvas de brillo de los materiales K_2YF_5 : 0.8% y 0.99% Tb.

Para el tercer pico la sensibilidad aumenta 32.4 veces nuevamente al aumentar el dopaje, con una desviación de 9.4, siendo mucho mayor en este pico el aumento en la sensibilidad.

En general se observa un aumento de la sensibilidad al aumentar el dopaje del terbio en 0.19 %.

2. Parámetros cinéticos.

i. Métodos de la forma del pico.

En la tabla 12 se muestran los resultados para las energía de activación de las trampas para el material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ por los diferentes tratamiento térmicos aplicados para aislar un pico y los diferente modelos del pico aislado y para el incremento inicial.

Material	T_m (°K)	Método /Modelo	Grossw E (eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada			Método /Modelo	E(eV)
						E_τ (eV)	E_δ (eV)	E_ω (eV)		
528#1	546.4	FP	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	II	1.3
528#1	461.9	-----	-----	-----	-----	-	-----	-----	II	0.9
528#1	521.9	-----	-----	-----	-----	-	-----	-----	-----	-----
528#1	595.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528#2	551.6	FP	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	II	1.0
528#2	433.2	-----	-----	-----	-----	-	-----	-----	II	
528#2	491.9	FP	0.6	0.8	0.7	0.5	0.5	0.5	-----	-----
528#2	568.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal31min	539.4	FP	0.9	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	II	0.4
528cal31min	430.9	-----	-----	-----	-----	-	-----	-----	II	1.4
531cal31min	474.6	FP	0.8	1.3	1.0	0.7	0.4	0.6	-----	-----
531cal31min	544.6	FP	1.7	1.2	1.1	1.7	0.9	1.0	-----	-----
528cal51min	532.4	FP	1.1	0.5	0.6	1.4	0.9	1.0	-----	-----
528cal51min	429.2	-----	-----	-----	-----	-	-	-----	II	1.8
528cal51min	474.6	FP	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	-----	-----
528cal51min	528.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal64min	534.2	FP	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	-----	-----
528cal64min	430.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II	1.9
528cal64min	474.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal64min	542.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
528cal104min	523.6	FP	1.2	0.9	1.0	1.2	1.1	1.2	-----	-----
528cal104min	420.4	-----	-----	-----	-----	-	-	-----	II	1.7
528cal104min	465.9	FP	1.1	1.1	1.7	1.1	1.1	1.1	-----	-----
528cal104min	516.6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 15. Energías de activación de las trampas ubicadas por temperatura para el material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$.

De los datos anteriores es necesario conocer el valor del error propagado al calcular los parámetros cinéticos de las trampas observadas en las curvas de brillo del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$. Para ello se realiza una separación de eventos correspondientes algún pico específico, que asumimos corresponde únicamente a una solo estado atrapante. Primeramente trabajaremos con los eventos que corresponden al tercer pico, observado a la temperatura más alta. En orden de calculo, primeramente se propagara el error sobre la energía de activación E, con unidades en eV, tomando en cuenta las ecuaciones de la tabla 1 utilizadas para los modelos utilizados del método de la forma del pico para calcular las energías de activación, se observa una dependencia de la energía E respecto de los parámetros T_1 , T_2 , T_m , τ , δ , ω de la curva de brillo aislada. Para propagar el error en la energía se utilizara la siguiente ecuación:

$$Disp_E = Disp_{T_1} \left(\frac{\partial E}{\partial T_1} \right)^2 + Disp_{T_2} \left(\frac{\partial E}{\partial T_2} \right)^2 + Disp_{T_m} \left(\frac{\partial E}{\partial T_m} \right)^2 + Disp_{\alpha} \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right)^2 \quad (26)$$

$$\alpha = \tau, \delta, \omega$$

Posteriormente se propagara el error sobre el calculo del factor pre-exponencial y por ultimo se repetirá el proceso para calcular el tiempo medio de vida de un electrón para cada estado atrapante y su error propagado para su calculo.

	T ₁	T ₂	T _m	τ	δ	ω	Orden Cinético
	511.4	570.6	546.4	34.9	24.2	59.2	1
	521.1	586.8	551.6	30.5	35.2	65.7	2
	504.4	562.2	539.4	35	22.7	57.7	1
	513.2	564.6	544.6	31.5	19.9	51.4	1
	497.4	611.2	532.4	35	78.7	113.7	2
	495.6	583.2	534.2	38.5	49	87.5	2
	491.7	565.2	523.6	31.9	41.6	73.5	2
Prom. (°K)	504.9	577.6	538.9	33.9	38.8	72.7	-----
Disp (°K ²)	114.6	308.6	91.6	7.6	424.6	468.7	-----

Tabla 16. Datos correspondientes a T₁, T₂, T_m, τ, δ, ω para el pico ubicado en promedio en 538.9°K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

Considerando que la energía de activación tiene una dependencia respecto de las variables tabuladas en la tabla 16, las cuales corresponden a un mismo estado atrapante entonces se puede calcular la cantidad de error propagado que se le imprime a la energía en su calculo por lo diferentes modelos, encontrándose lo siguiente:

Modelo	Orden Cinético	Disp _E (eV ²)	EE _E (eV)
Grossweiner	1	7x10 ⁻³	0.03
	2	9.9x10 ⁻³	0.04
Lushchik	1	0.4	0.2
	2	0.3	0.2
Chen 1 ^{era} Aprox.	1	0.05	0.1
	2	0.1	0.1
CHEN GENERALI ZADO	τ	0.4	0.2
	δ	0.5	0.3
	ω	1.9	0.5

Tabla 17. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

De la tabla 18 se puede agrupar los datos de energía calculados por el método de la forma del pico que corresponden al pico ubicado en promedio en 538.9°K.

	T _m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
						E _τ (eV)	E _δ (eV)	E _ω (eV)
	546.4	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9
	551.6	2.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4
	539.4	0.9	0.9	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9
	544.6	0.9	1.7	1.2	1.1	1.7	0.9	1.0
	532.4	3.4	1.1	0.5	0.7	1.4	0.9	1.0
	534.2	2.5	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0
	523.6	2.5	1.2	1.0	1.0	1.2	1.1	1.2
Prom.	538.9	1.9	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.1
Disp.	91.6	0.9	0.1	0.1	0.04	0.1	0.03	0.03

Tabla 18. Datos correspondientes a T_m, b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

Usando la ecuación 24 y los datos de la tabla 18 se calculan los factores pre-exponencial correspondientes a las energías calculas por modelo y evento.

	T _m (°K)	Grossw S(s ⁻¹)	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹)	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
	546.4	0.9x10 ¹⁰	4.2x10 ¹⁰	1.6x10 ¹⁰	0.5x10 ¹⁰	0.7x10 ¹⁰	0.7x10 ¹⁰
	551.6	3.6x10 ¹³	5.1x10 ¹²	1.1x10 ¹³	7.7x10 ¹³	3.0x10 ¹³	5.2x10 ¹³
	539.4	0.7x10 ¹⁰	1.3x10 ¹¹	2.2x10 ¹⁰	0.2x10 ¹⁰	0.1x10 ¹⁰	0.2x10 ¹⁰
	544.6	1.1x10 ¹⁷	5.3x10 ¹²	4.2x10 ¹¹	9.7x10 ¹⁶	0.5x10 ¹⁰	1.6x10 ¹⁰
	532.4	2.4x10 ¹¹	0.4x10 ⁶	0.1x10 ⁸	1.2x10 ¹⁴	0.4x10 ¹⁰	6.9x10 ¹⁰
	534.2	2.5x10 ¹⁰	0.1x10 ¹⁰	0.2x10 ¹⁰	5.7x10 ¹⁰	2.9x10 ¹⁰	3.6x10 ¹⁰
	523.6	2.2x10 ¹²	2.1x10 ¹⁰	1.1x10 ¹¹	9.8x10 ¹²	9.9x10 ¹¹	2.8x10 ¹²
Prom.	538.9	1.6x10 ¹⁶	1.5x10 ¹²	1.6x10 ¹²	1.4x10 ¹⁶	4.4x10 ¹²	7.8x10 ¹²
Disp.	91.6	1.7x10 ³³	6.3x10 ²⁴	1.7x10 ²⁵	1.4x10 ³³	1.3x10 ²⁶	3.8x10 ²⁶

Tabla 19. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

De la misma forma cuando se calcula el factor pre-exponencial se debe considerar que se propaga una cierta cantidad de error, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$Disp_S = Disp_E \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)^2 + Disp_{T_m} \left(\frac{\partial S}{\partial T_m} \right)^2 \quad (27)$$

Lo que se encuentra es lo siguiente:

Modelo	Disps (s ⁻²)	EEs (s ⁻¹)
Grossweiner	8.1x10 ²³	3.4x10 ¹¹
Lushchik	2.3x10 ²⁰	0.6x10 ¹⁰
Chen 1 ^{era} Aprox.	2.8x10 ²⁴	6.3x10 ¹¹
Chen Generalizado τ δ ω	6x10 ²⁴	9.3x10 ¹¹
	6.7x10 ²⁰	0.9x10 ¹⁰
	3.0x10 ²¹	2.1x10 ¹⁰

Tabla 20. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

Haciendo uso de las tablas anteriores se valúa el tiempo de vida media de un electrón en el estado atrapante que corresponde al tercer pico ubicado en 538.9 °K, mediante la ecuación 25.

	T_m (°K)	Grossw τ (s)	Lusch τ (s)	Chen 1 ^{era} τ (s)	Chen Generalizada τ (s)		
Prom.	538.9	1.8×10^{-6}	1.4×10^{-3}	1.5×10^{-3}	1.8×10^{-5}	9.7×10^{-4}	1.1×10^{-3}

Tabla 21. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 538.9 °K en promedio del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

La ecuación de Arrhenius depende la energía de activación, del factor pre-exponencial y de la temperatura, por lo que su error propagado se calcula mediante la ecuación:

$$Disp_{\tau} = Disp_E \left(\frac{\partial \tau}{\partial E} \right)^2 + Disp_S \left(\frac{\partial \tau}{\partial S} \right)^2 + Disp_{T_m} \left(\frac{\partial \tau}{\partial T_m} \right)^2 \quad (28)$$

De donde se encuentra:

Modelo	$Disp_S$ (s)	EE_S (s)
Grossweiner	0.1	0.1
Lushchik	6.7×10^{-5}	3.1×10^{-3}
Chen 1 ^{era} Aprox.	1.5×10^{-23}	1.5×10^{11}
Chen Generalizado $\tau \delta \omega$	1.5×10^{-8}	4.7×10^{-5}
	1.9×10^{-5}	1.7×10^{-3}
	2.6×10^{-5}	1.9×10^{-3}

Tabla 22. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 538.9 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

Nuevamente agrupando datos para el material K_2YF_5 : 0.8% Tb, que correspondan al **segundo pico** y que fueron aislados para aplicación del método de la forma del pico. Lo que se encuentra

	T_1	T_2	T_m	τ	δ	ω	Orden Cinético
	439.6	523.3	491.9	52.3	31.4	83.7	1
	44.6	489.2	474.6	30.1	14.5	44.6	1
	453.8	490.2	474.6	20.8	15.5	36.4	1
	442.9	482.4	465.9	22.9	16.5	39.5	1
Prom. (°K)	445.2	496.3	476.8	31.5	19.5	51.1	-----
Disp (°K ²)	36.9	336.7	118.7	206.9	63.8	485.5	-----

Tabla 23. Datos correspondientes a T_1 , T_2 , T_m , τ , δ , ω para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

Considerando que la energía de activación tiene una dependencia respecto de las variables tabuladas en la tabla anterior, las cuales corresponden a un mismo estado

atrapante ubicado en promedio a una temperatura de 476.8 °K entonces se puede calcular la cantidad de error propagado que se le imprime a la energía en su calculo por lo diferentes modelos, encontrándose lo siguiente:

Modelo	Orden Cinético	Disp _E (eV ²)	EE _E (eV)
Grossweiner	1	0.1	0.2
Lushchik	1	0.2	0.2
Chen 1 ^{era} Aprox.	1	0.1	0.2
Chen Generalizado	τ	0.7	0.4
	δ	2.8	0.8
	ω	1.4	0.6

Tabla 24. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

De las tablas anteriores se agrupan datos de temperatura T_m y energía que corresponden al segundo pico del material K₂YF₅: 0.8% Tb calculada por el método de la forma del pico.

	T _m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
						E _{τ} (eV)	E _{δ} (eV)	E _{ω} (eV)
	491.9	0.7	0.6	0.8	0.7	0.5	0.5	0.5
	474.6	0.3	0.8	1.3	1.0	0.7	0.4	0.6
	474.6	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3
	465.9	1.2	1.1	1.1	1.7	1.1	1.1	1.1
Prom.	476.8	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.8	0.9
Disp.	118.7	0.2	0.1	0.05	0.2	0.1	0.2	0.1

Tabla 25. Datos correspondientes a T_m, b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

Utilizando los datos de la tabla 25 se calcula el factor pre-exponencial para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

	T _m (°K)	Grossw S(s ⁻¹) ₁	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹) ₁	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
	491.9	0.1x10 ⁸	0.1x10 ¹⁰	0.1x10 ⁹	0.2x10 ⁷	0.1x10 ⁷	0.2x10 ⁷
	474.6	1.5x10 ¹⁰	1.5x10 ¹⁵	5.9x10 ¹¹	0.2x10 ⁹	0.6x10 ⁵	0.2x10 ⁸
	474.6	3.7x10 ¹⁴	1.5x10 ¹⁴	1.6x10 ¹⁴	9.9x10 ¹⁴	7.3x10 ¹⁴	1.2x10 ¹⁵
	465.9	1.0x10 ¹³	1.4x10 ¹³	4.7x10 ¹⁹	1.2x10 ¹³	9.0x10 ¹²	1.4x10 ¹³
Prom.	476.8	9.6x10 ¹³	4.1x10 ¹⁴	1.2x10 ¹⁹	2.5x10 ¹⁴	1.8x10 ¹⁴	2.9x10 ¹⁴
Disp.	118.7	3.5x10 ²⁸	5x10 ²⁹	5.6x10 ³⁸	2.5x10 ²⁹	1.3x10 ²⁹	3.3x10 ²⁹

Tabla 26. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb.

De la misma forma cuando se calcula el factor pre-exponencial se debe considerar que se propaga una cierta cantidad de error, y lo que se encuentra es lo siguiente:

Modelo	Disps (s ⁻²)	EEs (s ⁻¹)
Grossweiner	1.7x10 ²²	6.5x10 ¹⁰
Lushchik	3.1x10 ²⁵	2.8x10 ¹²
Chen 1 ^{era} Aprox.	5.8x10 ²⁶	1.2x10 ¹³
Chen Generalizado	1.9x10 ²¹	2.2x10 ¹⁰
	2.9x10 ¹⁹	0.3x10 ¹⁰
	6.3x10 ²⁰	1.2x10 ¹⁰

Tabla 27. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K₂YF₅; 0.8% Tb.

Usando las tablas anteriores se valúa el tiempo de vida media de un electrón en el estado atrapante que corresponde al tercer pico ubicado en 476.8 °K.

	T _m (°K)	Grossw τ(s)	Lusch τ(s)	Chen 1 ^{era} τ(s)	Chen Generalizada τ(s)		
Prom.	476.8	1.2x10 ⁻⁴	1.1x10 ⁻³	1.1x10 ⁻⁷	1.4x10 ⁻⁵	2.3x10 ⁻⁶	6.9x10 ⁻⁶

Tabla 28. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 476.77 °K en promedio del material K₂YF₅; 0.8% Tb.

Cuyo error propagado es

Modelo	Disps (s)	EEs (s)
Grossweiner	7.4x10 ⁻⁷	4.3x10 ⁻⁴
Lushchik	3.9x10 ⁻⁵	3.1x10 ⁻³
Chen 1 ^{era} Aprox.	1.4x10 ⁻¹²	5.9x10 ⁻⁷
Chen Generalizado	1.6x10 ⁻⁸	6.3x10 ⁻⁵
	6.2x10 ⁻¹⁰	1.2x10 ⁻⁵
	4.3x10 ⁻⁹	3.3x10 ⁻⁵

Tabla 29. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 476.77 °K del material K₂YF₅; 0.8% Tb.

En la tabla 30 se muestran los resultados para las energía de activación de las trampas para el material K₂YF₅; 0.9% y 0.99% Tb por los diferentes tratamiento térmicos aplicados para aislar un pico y los diferente modelos del pico aislado y para el incremento inicial.

Material	T _m (°K)	Método /Modelo	Grossw E (eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada			Método /Modelo	E(eV)
						E _τ (eV)	E _δ (eV)	E _ω (eV)		
XVII-10 #1	549.9	FP	1.5	1.1	1.2	1.7	1.4	1.5	II	1.0
XVII-10 #1	492.2	FP	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	II	1.3
XVII-10 #1	555.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
XVII-10 #2	546.4	FP	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	II	1.3
XVII-10 #2	430.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II	
XVII-10 #2	479.9	FP	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	-----	-----
XVII-10 #2	542.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
XVII-10 #3	528.9	FP	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	II	1.3
XVII-10 #3	422.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II	1.3
XVII-10 #3	472.9	FP	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.7	-----	-----
XVII-10 #3	541.2	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Material	T _m (°K)	Método /Modelo	Grossw E (eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada			Método /Modelo	E(eV)
						E _τ (eV)	E _δ (eV)	E _ω (eV)		
85 #1	556.9	FP	1.4	1.2	1.2	1.5	1.4	1.4	II	0.9
85 #1	416.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	II	0.6
85 #1	458.9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
85 #1	551.6	FP	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	-----	-----
85 #2	553.4	FP	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3	II	1.1
85 #2	422.2	FP	1.4	1.1	1.2	1.5	1.3	1.4	II	0.9
85 #2	462.4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
85 #2	551.6	FP	1.4	1.2	1.3	1.5	1.5	1.5	-----	-----

Tabla 30. Resultados de las energías de activación de las trampas ubicada por temperatura para los materiales K₂YF₅: 0.9% y 0.99% Tb por el método de la forma del pico.

De igual manera como se hizo para los picos asilados del material K₂YF₅: 0.8 % Tb, se realiza un análisis de los picos que se pueden aislar para el material K₂YF₅: 0.9 % Tb.

	T ₁	T ₂	T _m	τ	δ	ω	Orden Cinético
	522.1	590.2	549.9	27.8	40.3	68.1	2
	512.7	581.1	546.4	33.7	34.7	68.3	2
	501.7	558.8	528.9	27.2	29.9	57.1	2
Prom. (°K)	512.2	576.7	541.7	29.5	34.9	64.5	
Disp (°K ²)	103.8	259.4	126.6	12.8	26.6	40.9	

Tabla 31. Datos correspondientes a T₁, T₂, T_m, τ, δ, ω para el pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Considerando que la energía de activación tiene una dependencia respecto de las variables tabuladas en la tabla anterior, las cuales corresponden a un mismo estado atrapante ubicado en 541.7 °K en

promedio entonces se puede calcular la cantidad de error propagado que se le imprime a la energía en su cálculo por lo diferentes modelos, encontrándose lo siguiente:

Modelo	Orden Cinético	Disp _E (eV ²)	EE _E (eV)
Grossweiner	2	0.03	0.1
Lushchik	2	0.04	0.1
Chen 1 ^{era} Aprox.	2	0.02	0.1
Chen Generalizado	τ	0.3	0.3
	δ	0.1	0.2
	ω	0.2	0.3

Tabla 32. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 541.7 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

De las tablas anteriores se puede asociar algunos datos que corresponden al mismo material y al mismo evento de temperatura y por tanto de energía calculada por el método de la forma del pico, para el pico ubicado en promedio en 541.7 °K para el material K₂YF₅: 0.9% Tb.

	T _m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
						E _{τ} (eV)	E _{δ} (eV)	E _{ω} (eV)
	549.9	2.7	1.5	1.1	1.2	1.7	1.4	1.5
	546.4	2.1	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
	528.9	2.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Prom.	541.7	2.4	1.4	1.2	1.3	1.4	1.3	1.4
Disp.	126.6	0.1	0.02	0.02	7.7x10 ⁻³	0.06	0.01	0.03

Tabla 33. Datos correspondientes a T_m, b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 541.7 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Calculando nuevamente el factor pre-exponencial para el pico ubicado en promedio en 541.7 °K para el material K₂YF₅: 0.9% Tb.

	T _m (°K)	Grossw S(s ⁻¹)	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹)	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
	549.9	7.0x10 ¹⁴	1.3x10 ¹¹	3.3x10 ¹²	3.5x10 ¹⁶	1.9x10 ¹⁴	1.7x10 ¹⁵
	546.4	1.5x10 ¹²	6.0x10 ¹²	2.6x10 ¹²	8.2x10 ¹¹	1.8x10 ¹²	1.4x10 ¹²
	528.9	4.4x10 ¹⁴	1.7x10 ¹⁴	2.6x10 ¹⁴	6.7x10 ¹⁴	2.9x10 ¹⁴	5.1x10 ¹⁴
Prom.	541.7	3.8x10 ¹⁴	6.1x10 ¹³	8.8x10 ¹³	1.2x10 ¹⁶	1.6x10 ¹⁴	7.3x10 ¹⁴
Disp.	126.6	1.3x10 ²⁹	9.9x10 ²⁷	2.2x10 ²⁸	4.1x10 ³²	2.2x10 ²⁸	7.3x10 ²⁹

Tabla 34. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 541.7 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

De la misma forma cuando se calcula el factor pre-exponencial se debe considerar que se propaga una cierta cantidad de error, y lo que se encuentra es lo siguiente:

Modelo	Disp _s (s ⁻²)	EE _s (s ⁻¹)
Grossweiner	2.9x10 ²⁷	3.1x10 ¹³
Lushchik	1.2x10 ²⁵	2.0x10 ¹²
Chen 1 ^{era} Aprox.	6.9x10 ²⁵	4.8x10 ¹²
Chen Generalizado	5.6x10 ²⁸	1.4x10 ¹⁴
	1.1x10 ²⁷	1.9x10 ¹³
	6.0x10 ²⁷	4.5x10 ¹³

Tabla 35. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 541.73 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Usando las tablas anteriores se calcula el tiempo de vida media de un electrón en el estado atrapante que corresponde al tercer pico ubicado en 541.7 °K, para el material K₂YF₅: 0.9% Tb.

	T _m (°K)	Grossw S(s)	Lusch S(s)	Chen 1 ^{era} S(s)	Chen Generalizada S(s)		
Prom.	541.7	0.01	6.9x10 ⁻³	0.01	1.7x10 ⁻³	0.02	0.01

Tabla 36. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 541.7°K en promedio del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

La ecuación de Arrhenius depende la energía de activación, del factor pre-exponencial y de la temperatura, por lo que su error propagado

Modelo	Disp _s (s)	EE _s (s)
Grossweiner	0.8	0.5
Lushchik	5.8x10 ⁻⁴	0.01
Chen 1 ^{era} Aprox.	8.8x10 ⁻⁴	0.02
Chen Generalizado	8.7x10 ⁻⁵	5.4x10 ⁻³
	3.8x10 ⁻³	0.04
	1.7x10 ⁻³	0.02

Tabla 37. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 541.7 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Ahora se aplica el mismo procedimiento para el segundo pico ubicado en 481.6 °K, del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

	T ₁	T ₂	T _m	τ	δ	ω	Orden Cinético
	453.1	517.3	492.1	39	25.2	64.2	1
	446.4	501.2	479.9	33.5	21.3	54.7	1
	442.1	492.5	472.9	30.8	19.6	50.4	1
Prom. (°K)	447.2	503.7	481.6	34.4	22.0	56.4	
Disp (°K ²)	30.9	158.4	94.9	17.5	8.1	49.4	

Tabla 38. Datos correspondientes a T₁, T₂, T_m, τ, δ, ω para el pico ubicado en promedio en 481.6 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Considerando que la energía de activación tiene una dependencia respecto de las variables tabuladas en la tabla anterior, las cuales corresponden al pico ubicado en promedio en 481.6 °K para el material $K_2YF_5: 0.9\% Tb$ entonces se puede calcular la cantidad de error propagado que se le imprime a la energía en su calculo por lo diferentes modelos, encontrándose lo siguiente:

Modelo	Orden Cinético	Disp _E (eV ²)	EE _E (eV)
Grossweiner	1	8.9×10^{-3}	0.05
Lushchik	1	0.01	0.07
Chen 1 ^{era} Aprox.	1	1.1×10^{-3}	0.02
Chen Generalizado	τ	0.02	0.08
	δ	0.1	0.2
	ω	0.1	0.2

Tabla 39. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 481.6 °K del material $K_2YF_5: 0.9\% Tb$.

De las tablas anteriores se puede asociar algunos datos que corresponden al mismo material y al mismo evento de temperatura y por tanto de energía calculada por el método de la forma del pico, para el pico ubicado en 481.6 °K.

	T _m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
						E _{τ} (eV)	E _{δ} (eV)	E _{ω} (eV)
	492.1	0.9	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6
	479.9	0.9	0.8	0.9	0.82	0.7	0.7	0.7
	472.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7
Prom.	481.6	0.9	0.7	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7
Disp.	94.9	4.3×10^{-4}	4.3×10^{-3}	6×10^{-3}	4.4×10^{-3}	4.5×10^{-3}	3.3×10^{-3}	4.2×10^{-3}

Tabla 40. Datos correspondientes a T_m, b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 481.6 °K del material $K_2YF_5: 0.9\% Tb$.

Calculando sus correspondientes factores pre-exponenciales para el pico en 481.65 °K en promedio.

	T _m (°K)	Grossw S(s ⁻¹)	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹)	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
	492.1	0.1×10^9	0.2×10^{10}	0.4×10^9	0.3×10^8	0.2×10^8	0.3×10^8
	479.9	0.2×10^{10}	4.7×10^{10}	0.6×10^{10}	0.4×10^9	0.2×10^9	0.3×10^9
	472.9	0.7×10^{10}	2.2×10^{11}	2.7×10^{10}	0.2×10^{10}	0.9×10^9	0.2×10^{10}
Prom.	481.6	0.3×10^{10}	9.1×10^{10}	1.1×10^{10}	0.7×10^9	0.4×10^9	0.6×10^9
Disp.	94.9	1.5×10^{19}	1.4×10^{22}	1.9×10^{20}	8.8×10^{17}	2.2×10^{17}	7×10^{17}

Tabla 41. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 481.6 °K del material $K_2YF_5: 0.9\% Tb$.

De la misma forma cuando se calcula el factor pre-exponencial se debe considerar que se propaga una cierta cantidad de error, y lo que se encuentra es lo siguiente:

Modelo	Disps (s^{-2})	EEs (s^{-1})
Grossweiner	2.4×10^{17}	0.3×10^9
Lushchik	1.8×10^{20}	0.8×10^{10}
Chen 1 ^{era} Aprox.	3.4×10^{18}	0.1×10^{10}
Chen Generalizado	1.3×10^{16}	0.6×10^8
	3.7×10^{15}	0.3×10^8
	9.2×10^{15}	0.5×10^8

Tabla 42. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 481.6 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Usando las tablas anteriores se calcula el tiempo de vida media de un electrón en el estado atrapante que corresponde al segundo pico ubicado en 481.6 °K.

	T _m (°K)	Grossw S(s)	Lusch S(s)	Chen 1 ^{era} S(s)	Chen Generalizada S(s)		
Prom.	481.6	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04

Tabla 43. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 481.6°K en promedio del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Donde la ecuación de Arrhenius depende la energía de activación, del factor pre-exponencial y de la temperatura, por lo que su error propagado

Modelo	Disps (s)	EEs (s)
Grossweiner	5.1×10^{-3}	0.04
Lushchik	2.9×10^{-3}	0.03
Chen 1 ^{era} Aprox.	4.1×10^{-3}	0.04
Chen Generalizado	5.8×10^{-3}	0.04
	5.0×10^{-3}	0.04
	6.7×10^{-3}	0.05

Tabla 44. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 481.65 °K del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Repetiendo ahora el procedimiento para los picos que se aislaron para el material K₂YF₅: 0.99% Tb; En este caso solo se logro aislar el pico ubicado en 553.4 °K, que corresponde al tercer pico.

	T ₁	T ₂	T _m	τ	δ	ω	Orden Cinético
	526.1	595.6	556.9	30.7	38.7	69.4	2
	522.7	572.3	551.6	28.9	20.6	49.6	1
	522.1	589.5	553.4	31.3	36.1	67.4	2
	525.4	572.3	551.6	25.2	20.6	45.9	1
Prom. (°K)	524.3	582.4	553.4	29.0	29.0	58.1	
Disp (°K ²)	5.0	142.9	6.1	7.4	94.7	145.5	

Tabla 45. Datos correspondientes a T₁, T₂, T_m, τ, δ, ω para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K₂YF₅: 0.99% Tb.

Considerando que la energía de activación tiene una dependencia respecto de las variables tabuladas en la tabla anterior, entonces se puede calcular la cantidad de error propagado por modelos, encontrándose lo siguiente:

Modelo	Orden Cinético	Disp _E (eV ²)	EE _E (eV)
Grossweiner	1	0.01	0.06
	2	0.02	0.07
Lushchik	1	0.1	0.1
	2	0.3	0.3
Chen 1 ^{era} Aprox.	1	0.05	0.1
	2	0.1	0.2
Chen Generalizado	τ	0.2	0.2
	δ	0.5	0.4
	ω	0.7	0.4

Tabla 46. Error propagado en la energía por modelo y orden cinético para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K₂YF₅; 0.99% Tb.

De las tablas anteriores se puede asociar algunos datos que corresponden al mismo material y al mismo evento de temperatura y por tanto de energía calculada por el método de la forma del pico ubicado en promedio en 553.4°K para el material K₂YF₅; 0.99% Tb.

	T _m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
						E _{τ} (eV)	E _{δ} (eV)	E _{ω} (eV)
	556.9	2.5	1.4	1.2	1.2	1.5	1.4	1.4
	551.6	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	553.4	2.3	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3	1.3
	551.6	1.5	1.4	1.2	1.3	1.5	1.5	1.5
Prom.	553.4	1.9	1.3	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4
Disp.	6.1	0.4	7x10 ⁻³	1.1x10 ⁻³	1.7x10 ⁻³	0.02	0.02	0.02

Tabla 47. Datos correspondientes a T_m, b, E por modelo para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K₂YF₅; 0.99% Tb.

Calculando ahora el factor pre-exponencial

	T _m (°K)	Grossw S(s ⁻¹)	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹)	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
	556.9	3.9x10 ¹³	4.9x10 ¹¹	2.7x10 ¹²	2.7x10 ¹⁴	3.9x10 ¹³	1.0x10 ¹⁴
	551.6	1.5x10 ¹²	2.7x10 ¹²	1.5x10 ¹²	1.4x10 ¹²	1.2x10 ¹²	1.7x10 ¹²
	553.4	1.9x10 ¹³	2.7x10 ¹²	5.6x10 ¹²	3.8x10 ¹³	1.6x10 ³	2.7x10 ³
	551.6	8.2x10 ¹³	2.7x10 ¹²	1.2x10 ¹³	7.6x10 ¹⁴	1.2x10 ¹⁵	1.2x10 ¹⁵
Prom.	553.4	3.5x10 ¹³	2.2x10 ¹²	5.5x10 ¹²	2.7x10 ¹⁴	3.1x10 ¹⁴	3.3x10 ¹⁴
Disp.	6.1	1.2x10 ²⁷	1.3x10 ²⁴	2.2x10 ²⁵	1.2x10 ²⁹	3.3x10 ²⁹	3.3x10 ²⁹

Tabla 48. Factores pre exponenciales para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K₂YF₅; 0.99% Tb.

Propagando el error para el factor pre-exponencial.

Modelo	Disp _s (s ⁻²)	EE _s (s ⁻¹)
Grossweiner	1.4x10 ⁻²⁵	1.9x10 ¹²
Lushchik	6.7x10 ⁻²²	1.3x10 ¹¹
Chen 1 ^{era} Aprox.	3.9x10 ⁻²³	3.1x10 ¹¹
Chen Generalizado	2.6x10 ⁻²⁶	8.1x10 ²
	8.1x10 ⁻²⁵	4.5x10 ¹²
	1.9x10 ⁻²⁶	7x10 ¹²

Tabla 49. Error propagado en el factor exponencial para el pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K₂YF₅: 0.99% Tb.

Usando las tablas anteriores se calcula el tiempo de vida media de un electrón en el estado atrapante que corresponde al segundo pico ubicado en 553.4 °K.

	T _m (°K)	Grossw S(s)	Lusch S(s)	Chen 1 ^{era} S(s)	Chen Generalizada S(s)		
Prom.	553.4	0.04	0.07	0.06	0.01	7.8x10 ⁻³	0.01

Tabla 50. Valores calculados del tiempo de vida media de un electrón en el estado ubicado en 553.4°K en promedio del material K₂YF₅: 0.99% Tb.

Donde la ecuación de Arrhenius depende la energía de activación, del factor pre-exponencial y de la temperatura, por lo que su error propagado

Modelo	Disp _s (s)	EE _s (s)
Grossweiner	5.7x10 ⁻³	0.04
Lushchik	3.3x10 ⁻³	0.03
Chen 1 ^{era} Aprox.	4.9x10 ⁻³	0.03
Chen Generalizado	2.1x10 ⁻³	0.02
	6.7x10 ⁻⁴	0.01
	1.2x10 ⁻³	0.02

Tabla 51. Error propagado en el tiempo de vida media por modelo de energía para el método de la forma del pico usados, del pico ubicado en promedio en 553.4 °K del material K₂YF₅: 0.99% Tb.

Dentro del método de la forma del pico se puede trabajar también con la parte inicial de la curva de brillo, la cual se presume tiene una emisión tipo fosforescente, a este modelo se le conoce método del incremento inicial. Usando los datos extraídos de la parte inicial de la curva de brillo para el material K₂YF₅: 0.8% Tb. Primeramente para la marcada como 528#1 desvanecida a temperatura ambiente, se encuentran las siguientes curvas ajustadas para Ln I vs. 1/T de los picos T_m = 546.4 y 497.4 °K, donde la pendiente de la curva de ajuste esta relacionada con la energía de activación mediante la ecuación 23, las cuales son reportada en la tabla 52.

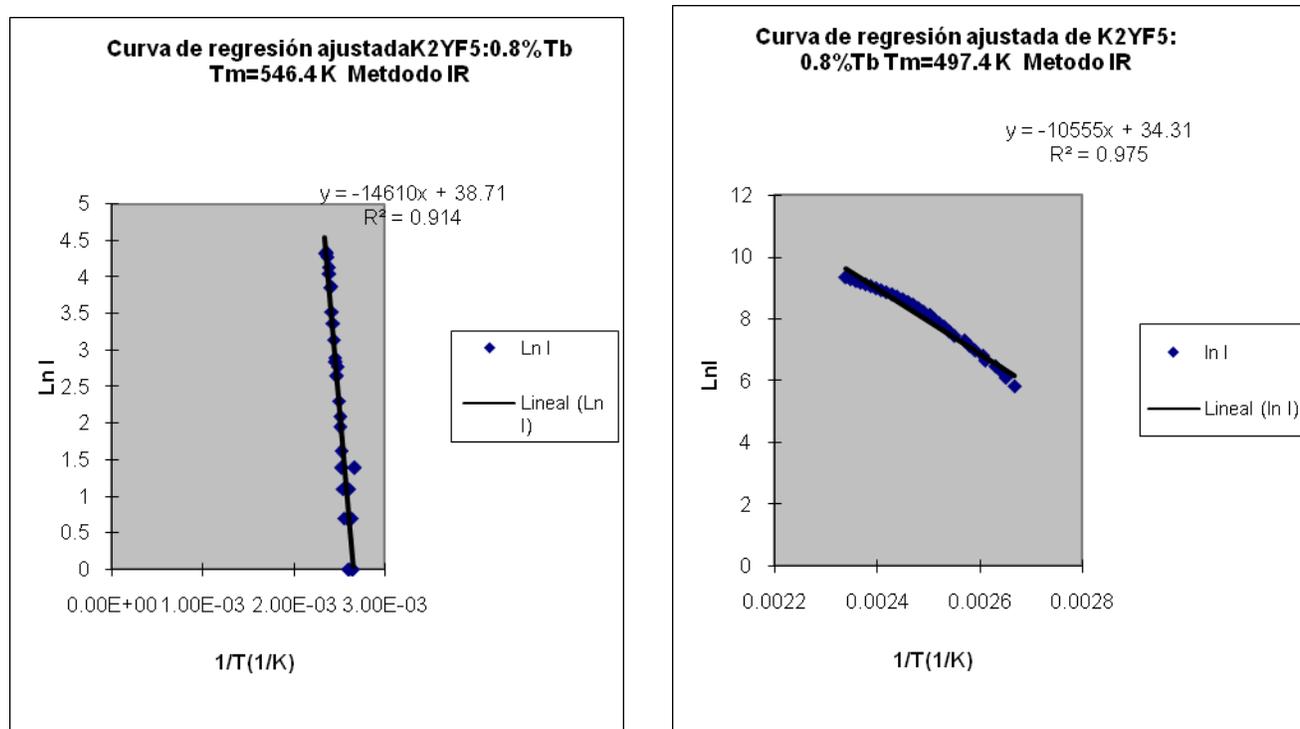


Fig. 45. Curvas de regresión ajustadas del $\ln I$ vs. $1/T$ para los picos en $T_m = 546.9$ y 497.4 °K que corresponden al primero y tercer pico del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ desvanecida a $T = 373.15$ °K.

De la misma forma para el material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$, marcada con 528 #2, que se desvaneció a temperatura ambiente se encuentran las siguientes curvas, utilizadas para determinar las energías de activación de los picos ubicados en $T_m = 551.65$ y 433.15 °K reportadas en la tabla 52.

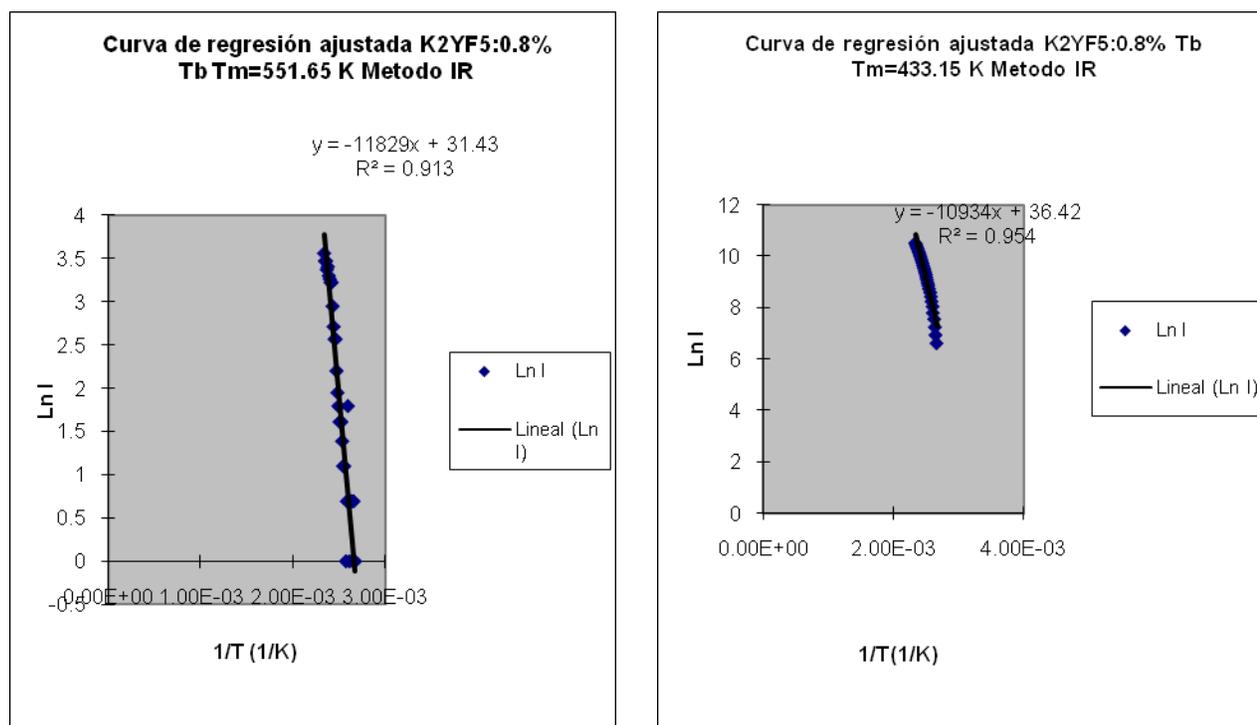


Fig. 46. Curvas de regresión ajustadas del $\ln I$ vs. $1/T$ para los picos en $T_m = 551.65$ y 433.15 °K que corresponden al primero y tercer pico del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ desvanecida a $T = 373.15$ °K.

Repitiendo el proceso y reportando la energía de activación del pico $T_m = 430.9$ °K en la tabla 52, para el material $K_2YF_5: 0.8\%$ Tb calcinada 31 minutos a 373.15 °K (528cal31) se encuentra:

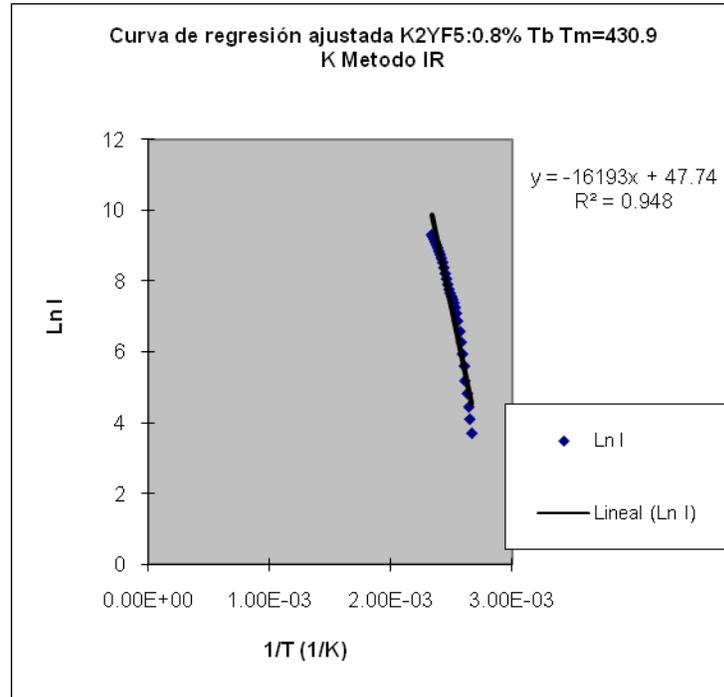


Fig. 47. Curvas de regresión ajustadas del $\ln I$ vs. $1/T$ para el pico en $T_m = 430.9$ °K que corresponden al primero pico del material $K_2YF_5: 0.8\%$ Tb calcinada 31 min. A 373.15 °K.

Ahora para el material $K_2YF_5: 0.8\%$ Tb calcinado durante 51 minutos a 373.15 °K (528cal51), se reporta en la tabla 52 la energía de activación del pico ubicado en $T_m = 429.15$ °K.

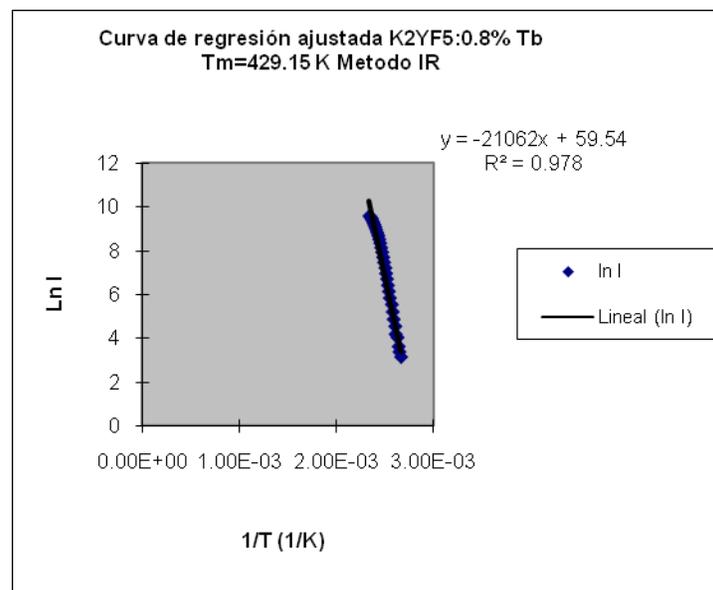


Fig. 48. Curva de regresión ajustada del $\ln I$ vs. $1/T$ para el pico en $T_m = 429.15$ °K que corresponden al primero pico del material $K_2YF_5: 0.8\%$ Tb calcinado 51 min. A 373.15 °K.

Repitiendo el proceso para la 528cal64min, material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ calcinado 51 minutos a $373.15^\circ K$, se reporta en la tabla 52 la energía de activación del pico $430.9^\circ K$.

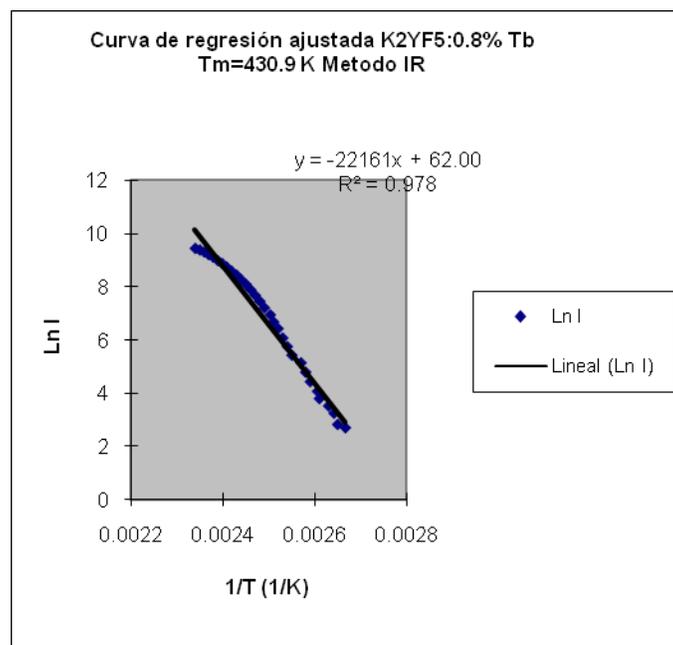


Fig. 49. Curva de regresión ajustada del $\ln I$ vs. $1/T$ para el pico en $T_m = 430.9^\circ K$ que corresponden al primero pico del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ calcinado 51 min. A $373.15^\circ K$.

Para el material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ calcinado 104 minutos a $373.15^\circ K$ se reporta la energía de activación del pico ubicado en $T_m = 420.4^\circ K$ (528cal104min) se encuentra:

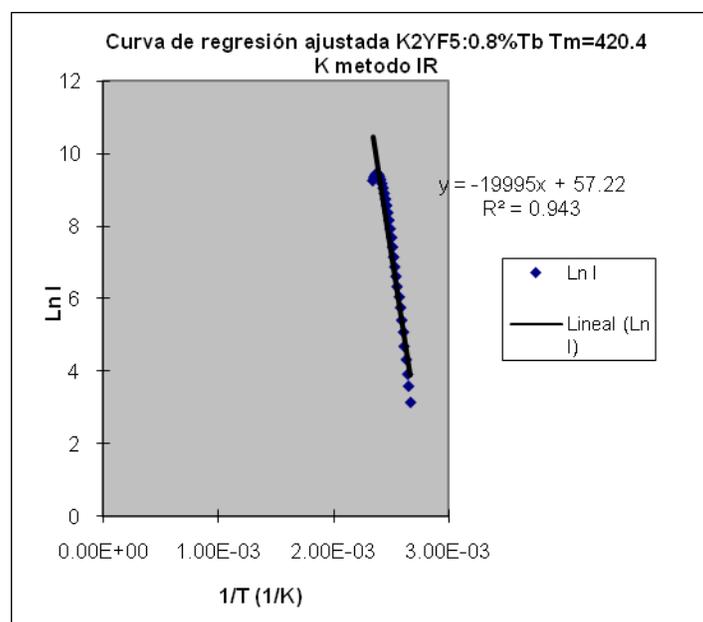


Fig. 50. Curva de regresión ajustada del $\ln I$ vs. $1/T$ para el picos en $T_m = 420.4^\circ K$ que corresponden al primero pico del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$ calcinado 104 min. A $373.15^\circ K$.

Se reportan los resultados de las energías de activación por pico y tratamiento térmico para el material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

Material	T_m (°K)	Método /Modelo	E(eV)
528#1	546.4	II	1.3
528#1	461.9	II	0.9
528#2	551.6	II	1.0
528#2	433.1	II	0.9
528cal31min	430.9	II	1.4
528cal51min	429.1	II	1.8
528cal64min	430.9	II	1.9
528cal104min	420.4	II	1.7

Tabla 52. Resultados del calculo de la energía de activación por el método de incremento inicial, para el material K_2YF_5 : 0.8% Tb.

Los resultados marcados corresponden a un mismo estado atrapante, correspondiente al tercer pico de la curva de brillo, los restantes resultados corresponden al primer pico de la curva de brillo Para el material K_2YF_5 : 0.9% Tb, se analizan las curvas obtenidas por desvanecimiento a temperatura ambiente, reportándose las energías de activación en la tabla 50. Para el XVII-10#1 , se encuentra las siguientes curvas de ajuste de los picos ubicados en $T_m = 549.9$ y 492.15 °K

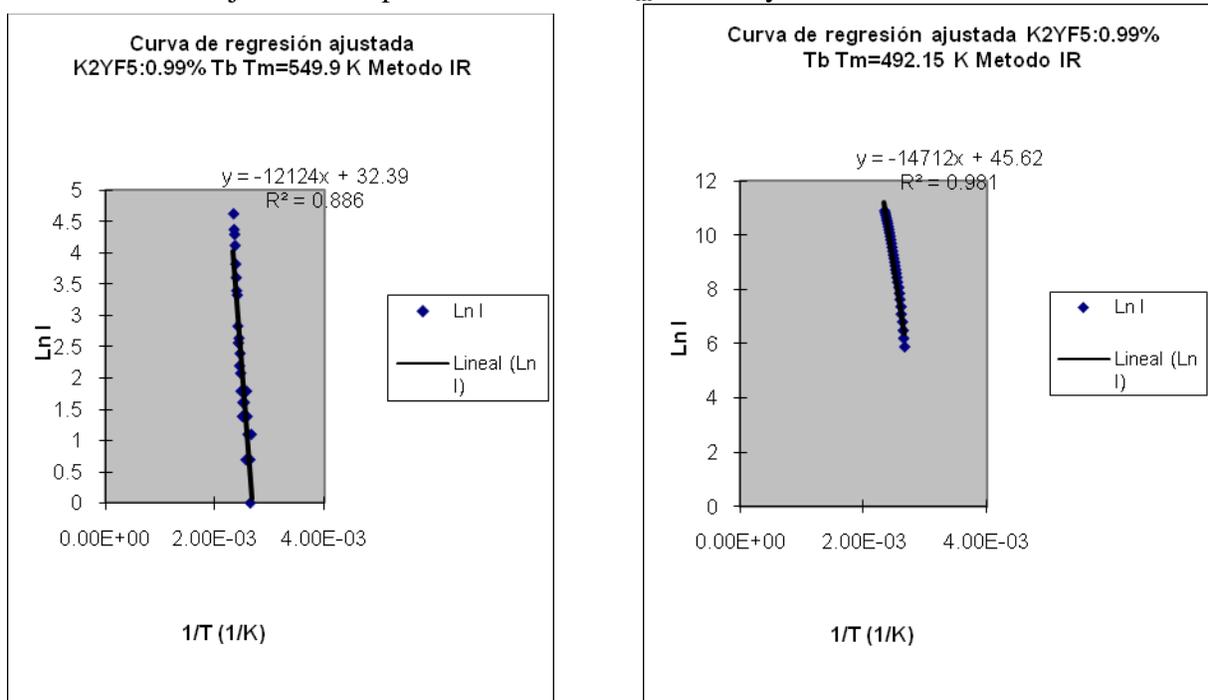


Fig.51. Curvas de regresión ajustadas del Ln I vs. 1/T para los picos en $T_m = 549.9$ y 492.15 °K que corresponden al primero y tercer pico del material K_2YF_5 : 0.9% Tb desvanecido a $T = 373.15$ °K

Para el XVII#2 se analizan las curvas de los picos en $T_m = 546.4$ y 430.9 °K, y se reportan las energías de activación en la tabla 53.

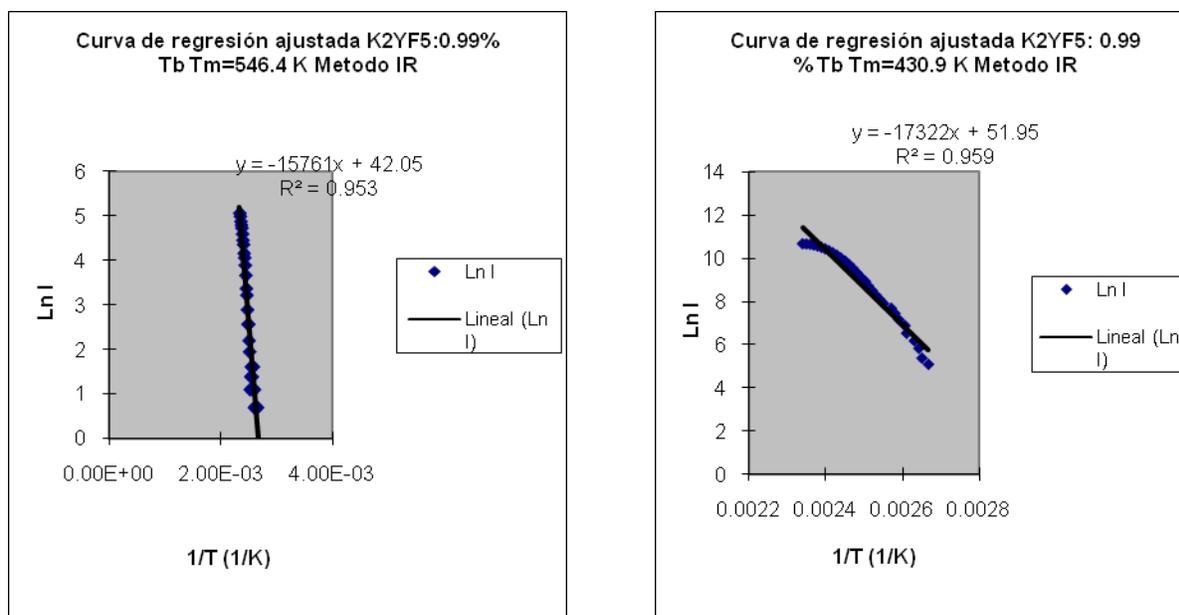


Fig. 52. Curvas de regresión ajustadas del Ln I vs. 1/T para los picos en $T_m = 549.9$ y 492.15 °K que corresponden al primero y tercer pico del material $K_2YF_5: 0.9\%$ Tb desvanecido a $T = 373.15$ °K

Para XVII-10#3 se reportan los picos ubicados en $T_m = 528.9$ y 422.15 °K.

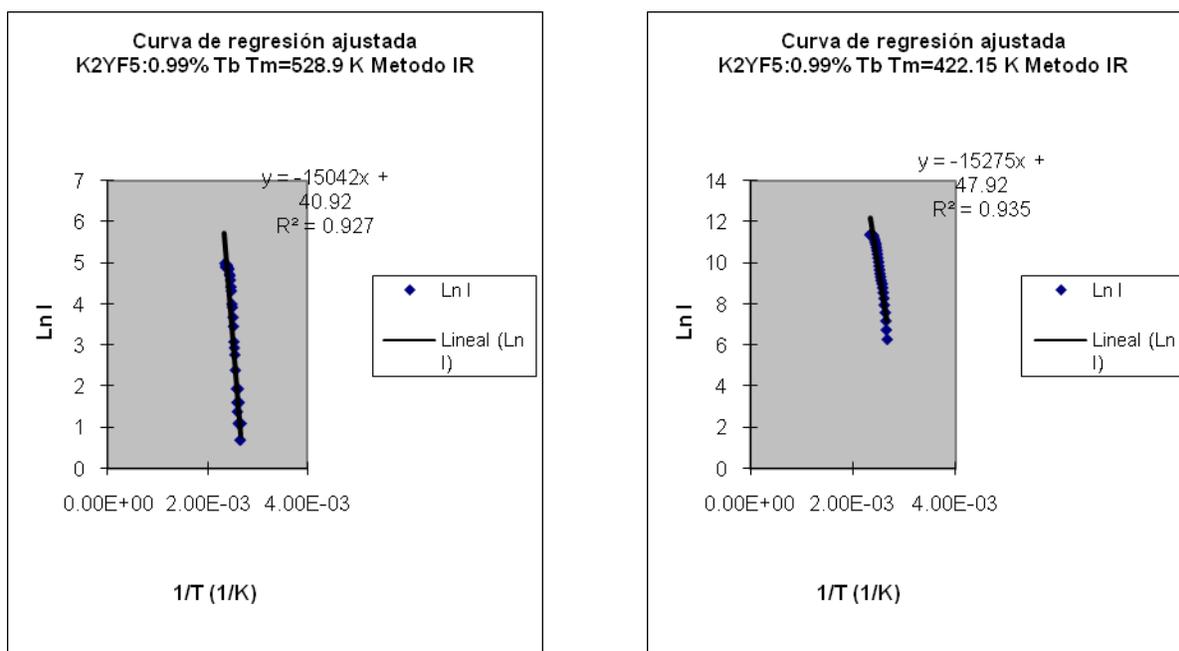


Fig. 53. Curvas de regresión ajustadas del Ln I vs. 1/T para los picos en $T_m = 528.9$ y 422.15 °K que corresponden al primero y tercer pico del material $K_2YF_5: 0.9\%$ Tb desvanecido a $T = 373.15$ °K

Donde los resultados de las energías de activación para el material $K_2YF_5: 0.9\%$ Tb por el método del incremento inicial se reportan en la tabla 53.

Material	T _m (°K)	Método /Modelo	E(eV)
XVII-10 #1	549.9	II	1.0
XVII-10 #1	492.1	II	1.3
XVII-10 #2	546.4	II	1.3
XVII-10 #2	430.9	II	1.5
XVII-10 #3	528.9	II	1.3
XVII-10 #3	422.1	II	1.3

Tabla 53. Resultados del calculo de la energía de activación por el método de incremento inicial, para el material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Los resultados marcados corresponden al mismo estado atrapante en este caso se refiere a la tercer pico de la curva de brillo del material K₂YF₅: 0.9% Tb.

Realizando el mismo análisis para el material K₂YF₅: 0.99% Tb desvanecido a temperatura ambiente se reportan en la tabla 54 las energías de activación primeramente para el 85#1, los picos ubicados en T_m = 556.9 y 416.9 °K.

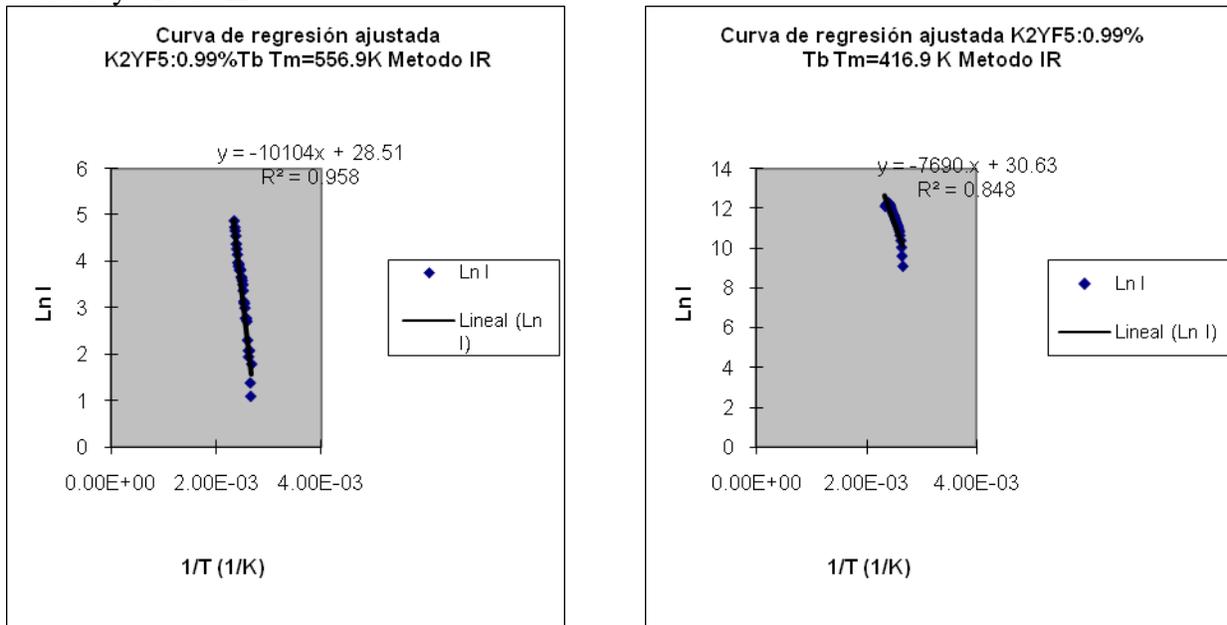


Fig. 54. Curvas de regresión ajustadas del LnI vs. 1/T para los picos en T_m = 556.9 y 416.9 °K que corresponden al primero y tercer pico del material K₂YF₅: 0.99% Tb desvanecido a T = 373.15 °K

Para el 85#2 se reportan en la tabla 54 las energías de activación de los picos en T_m = 553.4 y 422.15 °K.

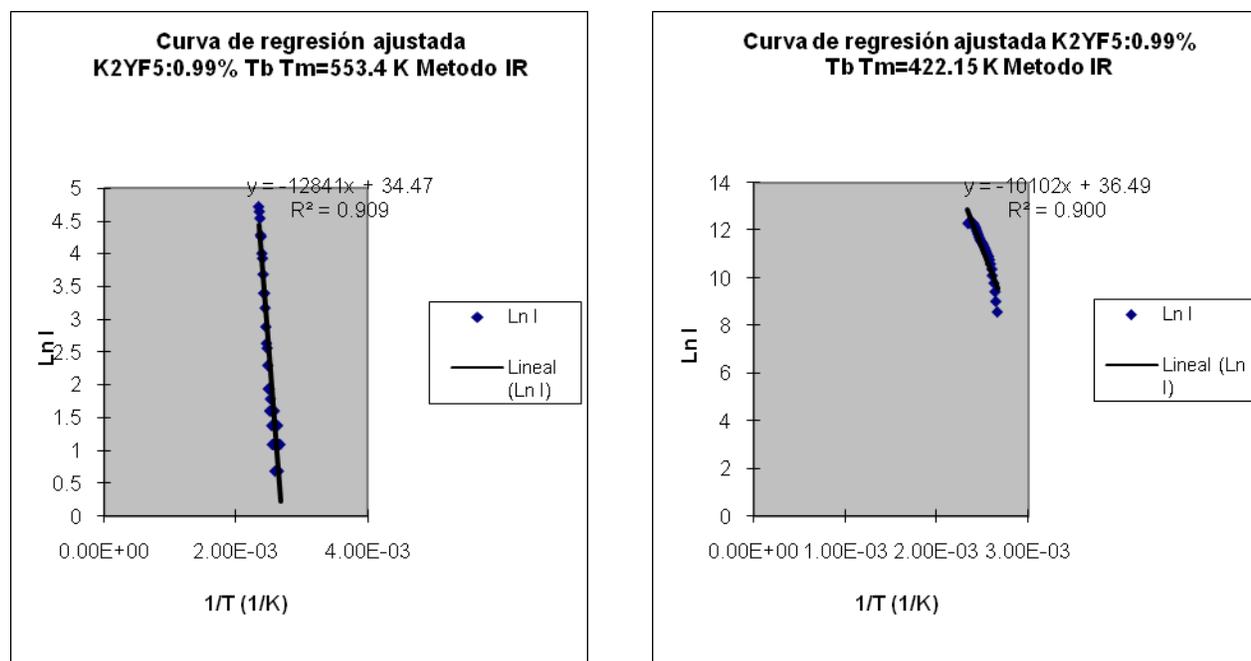


Fig. 55. Curvas de regresión ajustadas del $\text{Ln } I$ vs. $1/T$ para los picos en $T_m = 553.4$ y 422.15 °K que corresponden al primero y tercer pico del material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.99\% \text{ Tb}$ desvanecido a $T = 373.15$ °K

Los resultados de las energías de activación por el método del incremento inicial para el material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.99\% \text{ Tb}$ se reportan en la tabla 54.

Material	T_m (°K)	Método /Modelo	E(eV)
85 #1	556.9	II	0.9
85 #1	416.9	II	0.6
85 #2	553.4	II	1.1
85 #2	422.1	II	0.9

Tabla 54. Resultados del cálculo de la energía de activación por el método de incremento inicial, para el material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.99\% \text{ Tb}$.

ii. Método de decaimiento isotérmico.

MODELO DE GARLICK-GIBSON.

Mediante el uso de las tablas 3 y 4 se construyen para cada pico del material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.8\% \text{ Tb}$, de acuerdo a la ecuación 17 las curvas de ajuste de los datos del $\text{Ln}(I/I_0)$ vs. t por temperatura de decaimiento, de donde el logaritmo natural de la pendiente de la recta obtenida tiene una dependencia inversa con la temperatura de desvanecimiento de acuerdo a la ecuación 16, donde la nueva pendiente está relacionada con la energía de activación de los estados atrapantes correspondientes a los picos de curva de brillo. Esto corresponde a un modelo de primer orden cinético de Garlick-Gibson.

Para el pico ubicado en $T_m = 422.1$ °K, se espera de acuerdo a la ecuación 16 que el comportamiento de $\text{Ln}(I/I_0)$ vs t sea lineal.

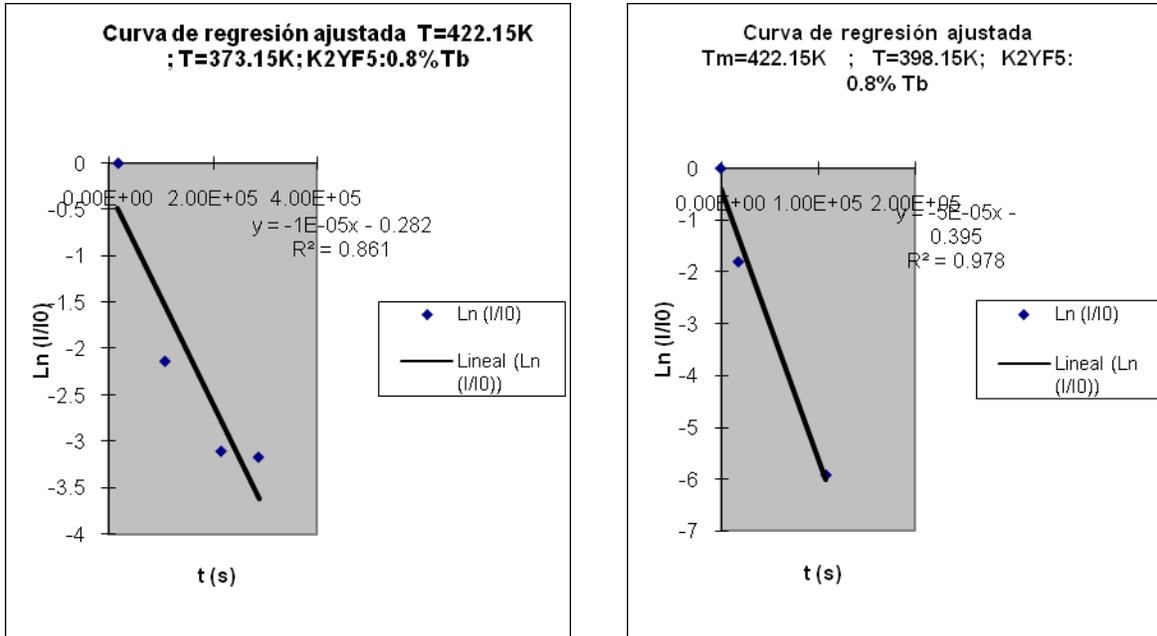


Fig. 56. Curvas de Ln (I/I₀) vs t para el pico ubicado en T_m= 422.15 °K, del material K₂YF₅: 0.8% Tb, tratadas por el modelo de Garlick-Gibson.

Aunque la correlación lineal para las graficas de la figura 56 son bajas se observa una tendencia lineal en su comportamiento. Por lo que una vez adquiridas las pendientes, p, de la curvas anteriores se ajusta mediante una recta el Ln p vs 1/T de donde a primer orden cinético la pendiente nueva que se obtiene de este ultimo ajuste se relaciona con la energía de activación como se ve en la ecuación 16; la energía se reporta en la tabla 55.

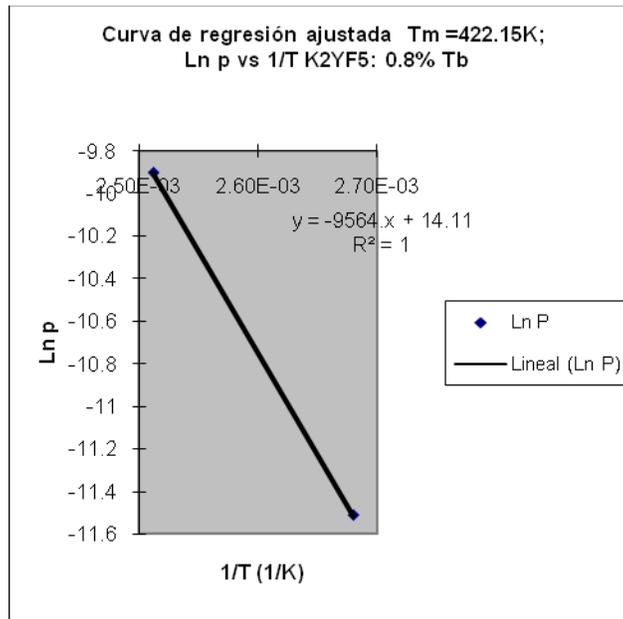


Fig. 57. Curva de ajuste de Ln p vs 1/T para el pico 422.15 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb, tratada por el modelo de Garlick-Gibson.

Repetiendo el procedimiento para el pico ubicado en T_m = 464.1 °K.

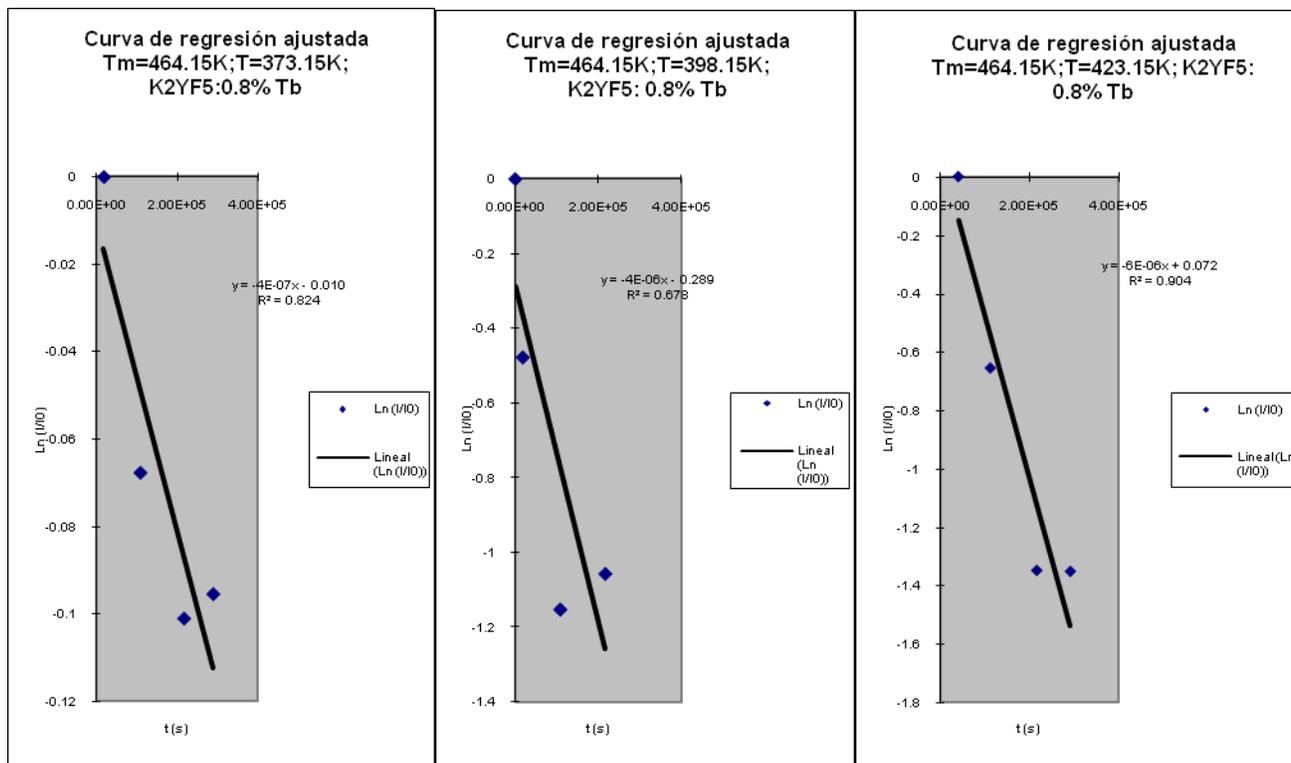


Fig. 58. Curvas de $\ln(I/I_0)$ vs t para el pico ubicado en $T_m = 464.15$ °K, del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$, tratadas por el modelo de Garlick-Gibson.

Nuevamente se ajusta el logaritmo natural de las pendientes contra el inverso de la temperatura para calcular a través de la nueva pendiente la energía de activación, reportada en la tabla 55.

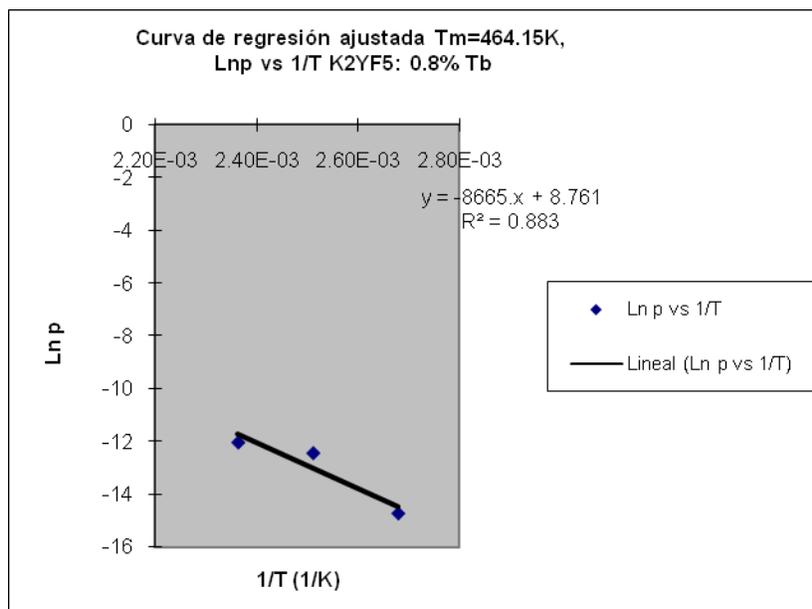


Fig. 59. Curva de ajuste de $\ln p$ vs $1/T$ para el pico 464.15 °K del material $K_2YF_5: 0.8\% Tb$, tratada por el modelo de Garlick-Gibson.

Repetiendo el procedimiento para el pico en $T_m = 520.1$ °K.

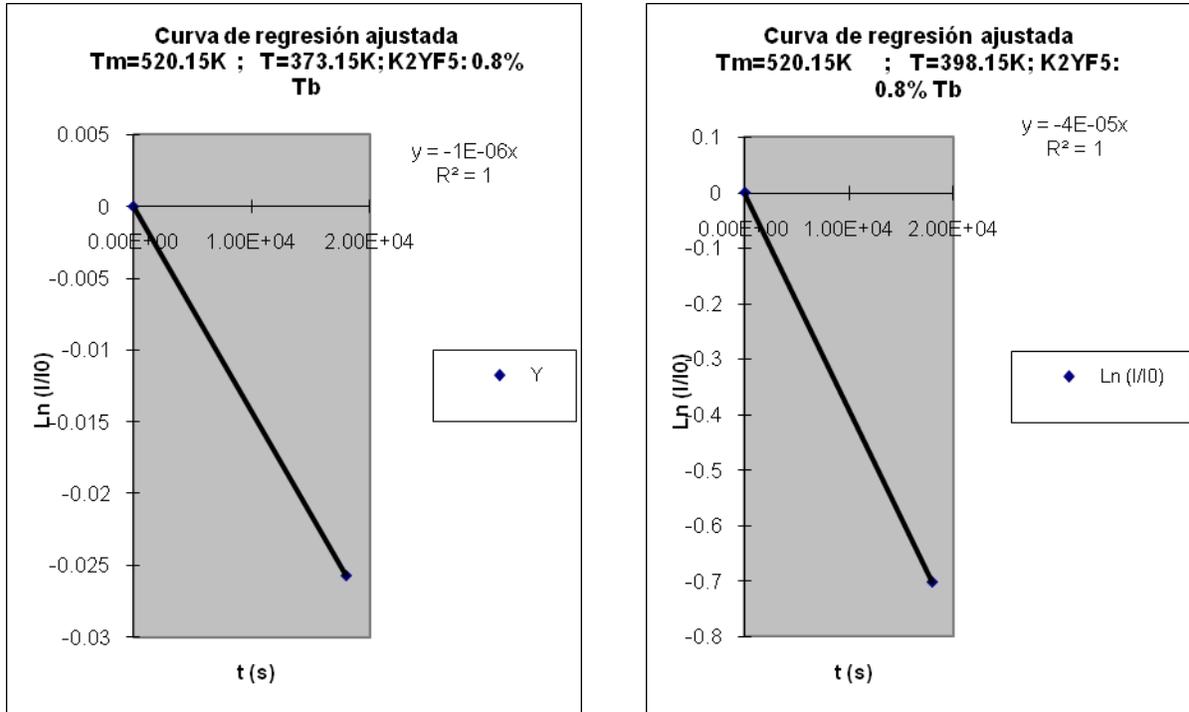


Fig. 60. Curvas de ajuste de Ln (I/I₀) vs t para el pico ubicado en T_m= 520.15 °K, del material K₂YF₅: 0.8% Tb, tratadas por el modelo de Garlick-Gibson.

Utilizando las pendientes y las temperaturas de desvanecimiento se ajusta Ln p vs 1/T, para determinar mediante la nueva pendiente la energía de activación reportada en la tabla 55.

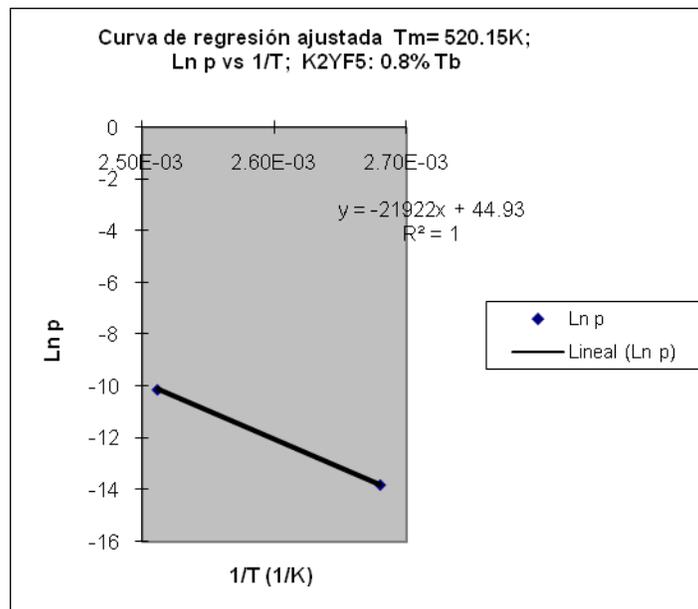


Fig. 61. Curva de ajuste de Ln p vs 1/T para el pico 520.15 °K del material K₂YF₅: 0.8% Tb, tratada por el modelo de Garlick-Gibson.

MODELO DE TAKEUCHI.

Una vez analizado el material K₂YF₅: 0.8% Tb por el modelo de Garlick-Gibson en el que se asumió un primer orden cinético para todos los picos de este material, se le aplica ahora un modelo de orden cinético general de Takeuchi, para realizar una comparativa de resultados en las energías activación.

En este modelo se analiza la dependencia lineal de $(I_0/I)^{1-1/b}$ vs t , donde t es el tiempo de desvanecimiento a temperatura T , expresando por la ecuación 22, donde nuevamente el logaritmo natural de la pendiente, p , de la recta obtenida es inversamente proporcional a la temperatura T , de desvanecimiento del material. Donde la pendiente de la recta del ajuste de $\ln p$ vs $1/T$ esta relacionada con la energía de activación del estado atrapante en estudio, como se ve en la ecuación 22.

Para el pico ubicado en $T_m = 422.1 \text{ }^\circ\text{K}$.

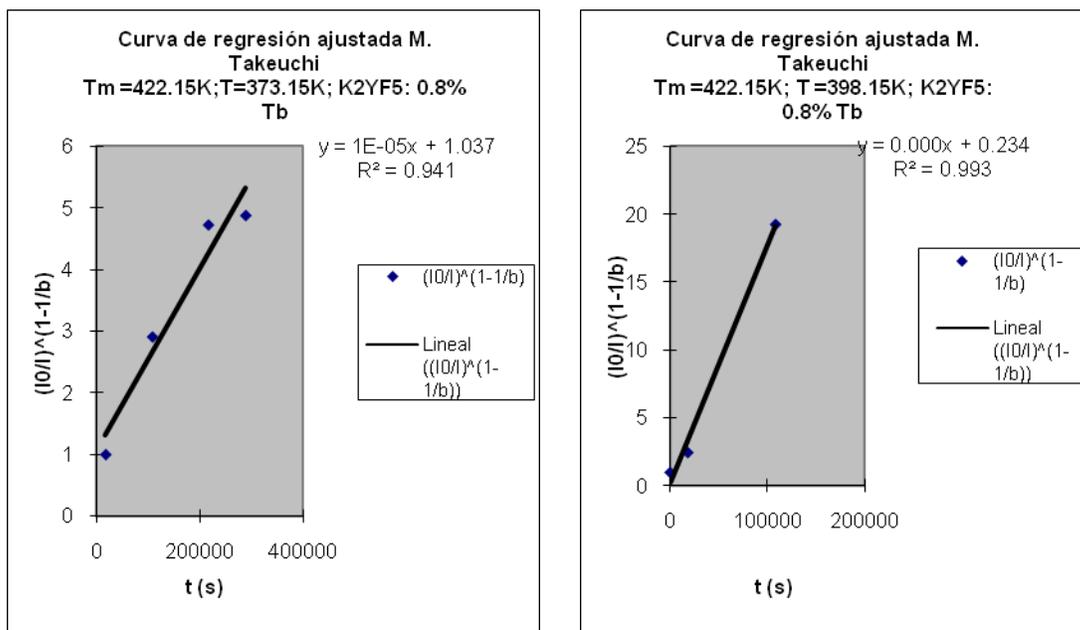


Fig. 62. Curvas de ajuste de $\ln(I/I_0)$ vs t para el pico ubicado en $T_m = 422.15 \text{ }^\circ\text{K}$, del material K_2YF_5 : 0.8% Tb, tratadas por el modelo de Takeuchi.

Se observa que una correlación “buena” en ambos ajustes de las curvas anteriores. Ahora, nuevamente se ajusta en este caso $\ln p$ vs $1/T$, pero utilizando el modelo de orden general para la determinación de la energía de activación como se ve en la ecuación 22; la energía es reportada en la tabla 55.

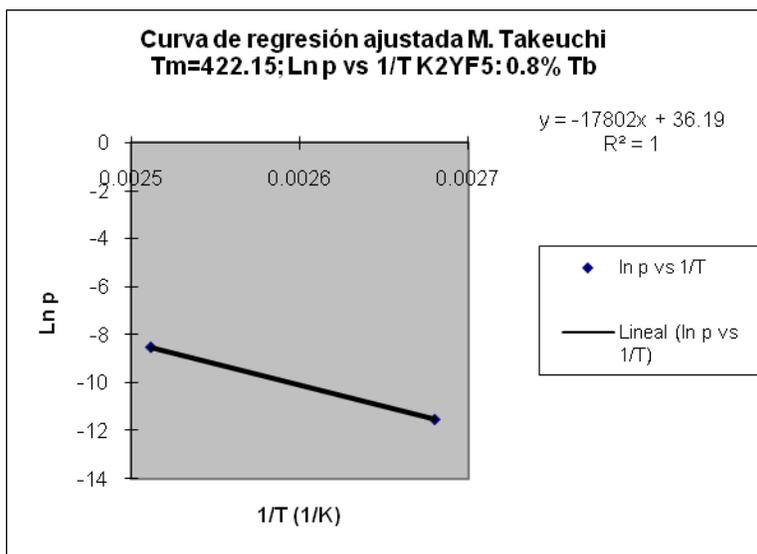


Fig. 63. Curva de ajuste de $\ln p$ vs $1/T$ para el pico $422.15 \text{ }^\circ\text{K}$ del material K_2YF_5 : 0.8% Tb, tratada por el modelo de Takeuchi.

Para $T_m = 464.15 \text{ }^\circ\text{K}$, se repite el procedimiento para encontrar la energía de activación, reportadas en la tabla 55.

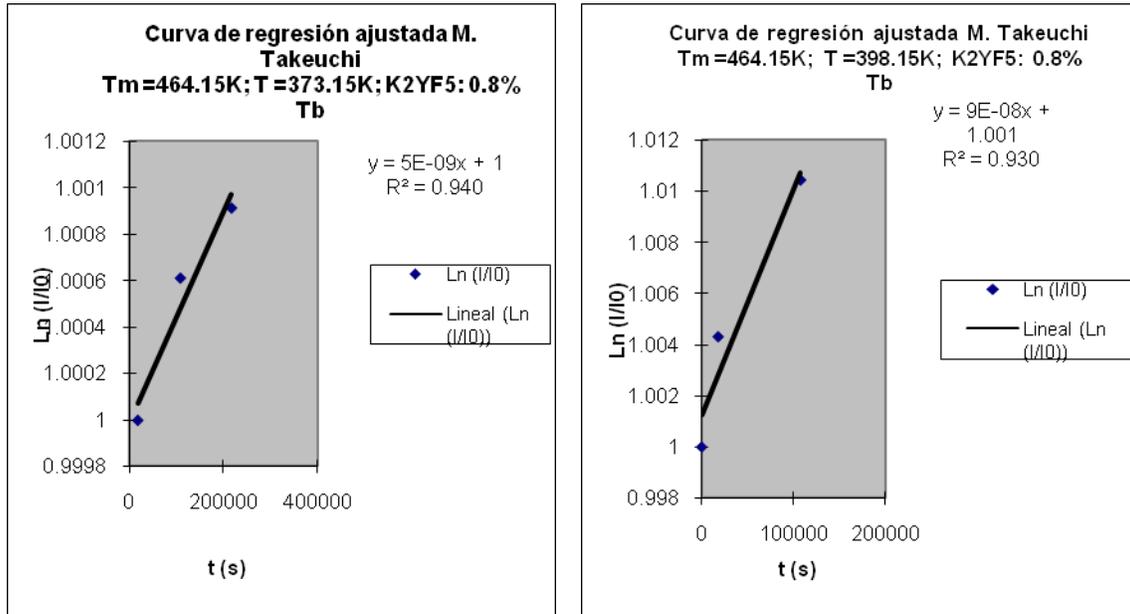


Fig. 64. Curvas de ajuste de $\ln(I/I_0)$ vs t para el pico ubicado en $T_m= 464.15 \text{ }^\circ\text{K}$, del material K_2YF_5 : 0.8% Tb, tratadas por el modelo de Takeuchi.

Con el logaritmo natural de las pendientes de las curvas anteriores y el inverso de la temperatura de desvanecimiento para cada curva se calcula una nueva pendiente que se calcula la energía de activación.

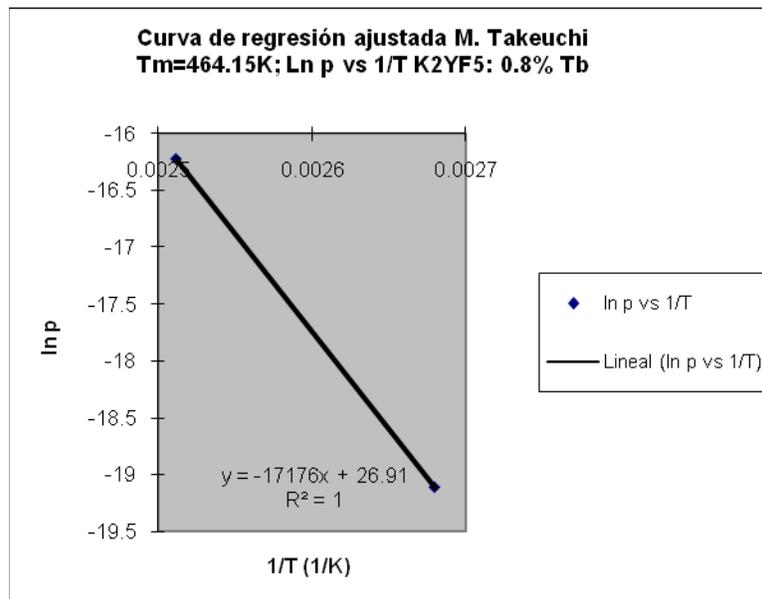


Fig. 65. Curva de ajuste de $\ln p$ vs $1/T$ para el pico $464.15 \text{ }^\circ\text{K}$ del material K_2YF_5 : 0.8% Tb, tratada por el modelo de Takeuchi.

Para el pico ubicado en $T_m = 520.1 \text{ }^\circ\text{K}$ se encuentran las siguientes curvas correspondientes a $\ln(I/I_0)$ vs. t de es desvanecimiento isotérmico.

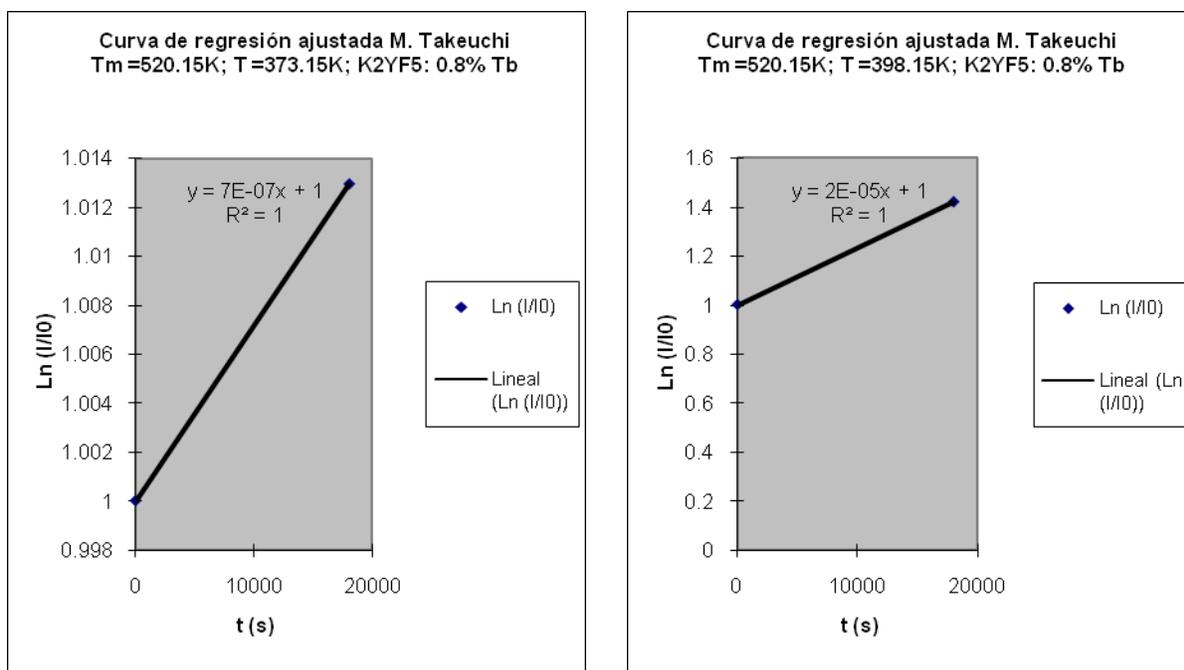


Fig. 66. Curvas de ajuste de $\ln(I/I_0)$ vs. t para el pico ubicado en $T_m = 520.15$ °K, del material K_2YF_5 : 0.8% Tb, tratadas por el modelo de Takeuchi.

Con las pendientes de las curvas anteriores se ajusta su logaritmo natural contra el inverso de la temperatura de desvanecimiento del material para calcular la energía de activación, reportada en la tabla 55.

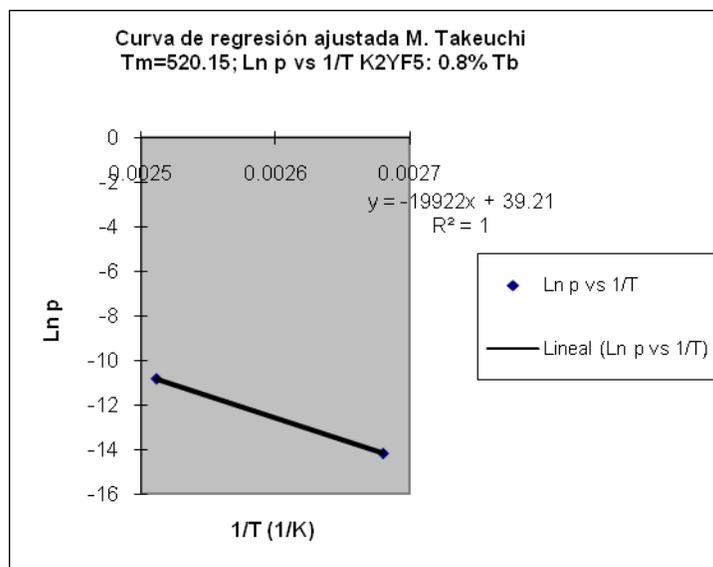


Fig. 67. Curva de ajuste de $\ln p$ vs. $1/T$ para el pico 520.15 °K del material K_2YF_5 : 0.8% Tb, tratada por el modelo de Takeuchi.

En la tabla 55 se reportan los resultados para las energías de activación calculadas por el método de decaimiento isotérmico mediante los modelos de Garlick-Gibson de primer orden cinético y de Takeuchi de orden cinético general.

T_m (°K)	Orden cinético	Modelo	Ecuación	Energía (eV)
422.15	2	Garlick-Gibson	$\ln p = -9564.6(1/T) + 14.119$	0.8
		Takeuchi	$\ln p = -17802(1/T) + 36.195$	1.5
464.15	1.01	Garlick-Gibson	$\ln p = -8665.9(1/T) + 8.7614$	0.7
		Takeuchi	$\ln p = -17176(1/T) + 26.916$	1.5
520.15	2	Garlick-Gibson	$\ln p = -21922(1/T) + 44.934$	1.9
		Takeuchi	$\ln p = -19922(1/T) + 39.216$	1.7

Tabla 55. Energía de activación del material K_2YF_5 : 0.8% Tb por método de desvanecimiento isotérmico.

Usando ahora las tablas 8 y 9 se encuentran las curvas de ajuste para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb para el cálculo de la energía de activación de la misma forma como se trataron las curvas anteriores.

Se trataran primeramente mediante el modelo de Garlick-Gibson. Se inicio con el pico ubicado en $T_m = 418.6$ °K.

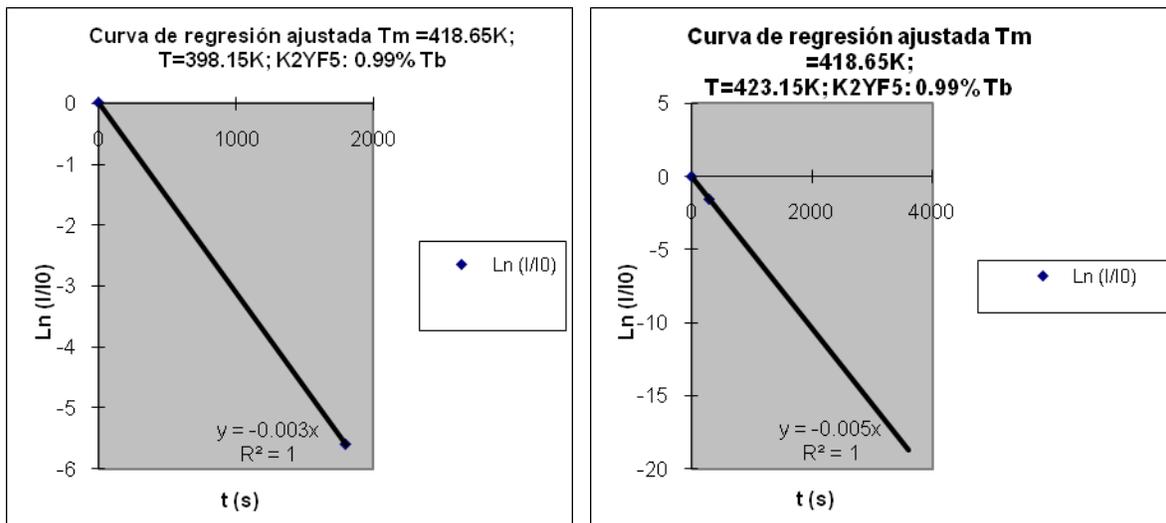


Fig. 68. Curvas de ajuste de $\ln(I/I_0)$ vs t para el pico ubicado en $T_m = 418.65$ °K, del material K_2YF_5 : 0.99% Tb, tratadas por el modelo de Garlick-Gibson.

Ajustando ahora el logaritmo natural de la pendiente de las curvas anteriores contra el inverso de la temperatura de desvanecimiento del material, para determinar una nueva pendiente de este ajuste y calcular con ella la energía de activación, que se reporta en la tabla 56.

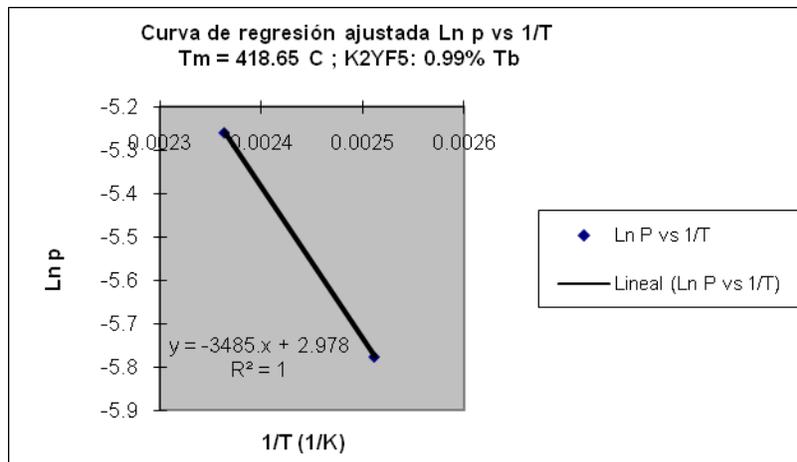


Fig. 69. Curva de ajuste de $\ln p$ vs $1/T$ para el pico 418.65 °K del material K_2YF_5 : 0.99% Tb, tratada por el modelo de Garlick-Gibson.

Continuando para el pico ubicado en $T_m = 460.6 \text{ }^\circ\text{K}$, se ajusta primeramente $\ln(I/I_0)$ vs t , para determinar las pendientes de las rectas esperadas.

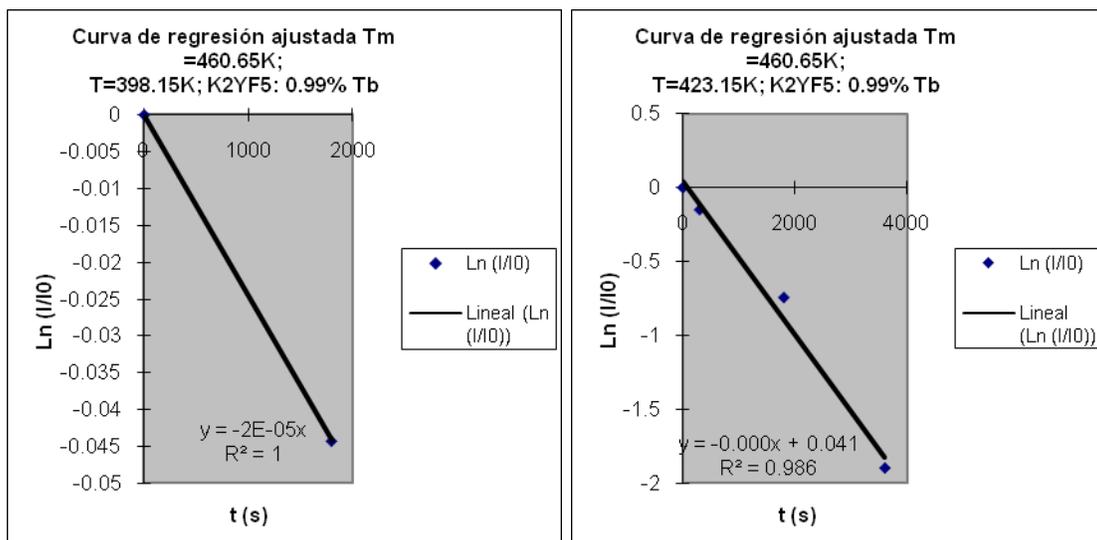


Fig.70. Curvas de ajuste de $\ln(I/I_0)$ vs t para el pico ubicado en $T_m = 460.65 \text{ }^\circ\text{K}$, del material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.99\% \text{ Tb}$, tratadas por el modelo de Garlick-Gibson.

Ajustando ahora $\ln p$ vs $1/T$, para determinar una nueva pendiente que utilizara para calcular la energía de activación, reportada en la tabla 56.

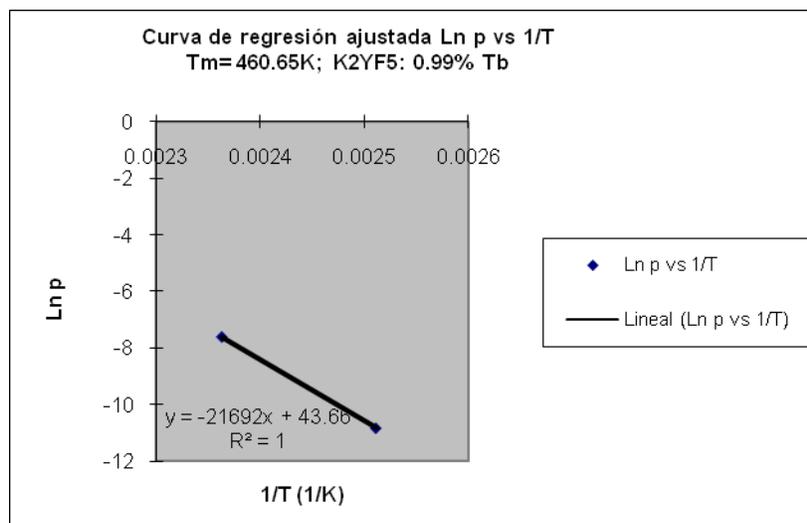


Fig. 71. Curva de ajuste de $\ln p$ vs $1/T$ para el pico $418.65 \text{ }^\circ\text{K}$ del material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.99\% \text{ Tb}$, tratada por el modelo de Garlick-Gibson.

Una vez hecho una aproximación asumiendo un primer orden cinético por el modelo de Garlick-Gibson para los picos reportados se procese de aplicar un modelo orden general, Takeuchi, procediendo de manera similar a como se realizo para el material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.8\% \text{ Tb}$.

Primeramente para el pico ubicado en $T_m = 418.6 \text{ }^\circ\text{K}$

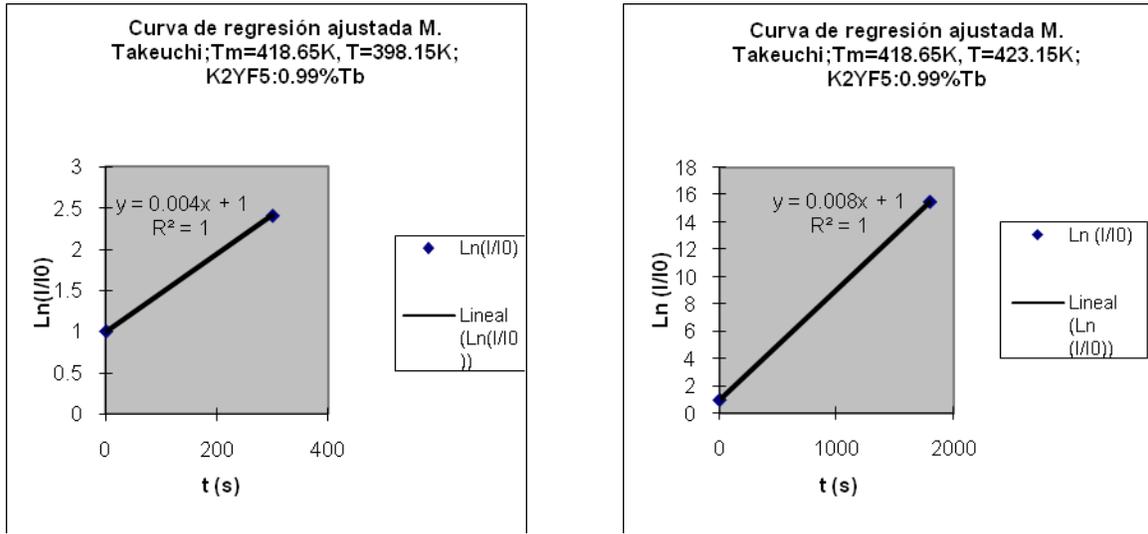


Fig. 72. Curvas de ajuste de $\text{Ln}(I/I_0)$ vs t para el pico ubicado en $T_m = 418.65 \text{ }^\circ\text{K}$, del material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.99\% \text{ Tb}$, tratadas por el modelo de Takeuchi.

Ajustando $\text{Ln } p$ vs $1/T$ para el pico $T_m = 418.6 \text{ }^\circ\text{K}$ para reportar la energía de activación en la tabla 56.

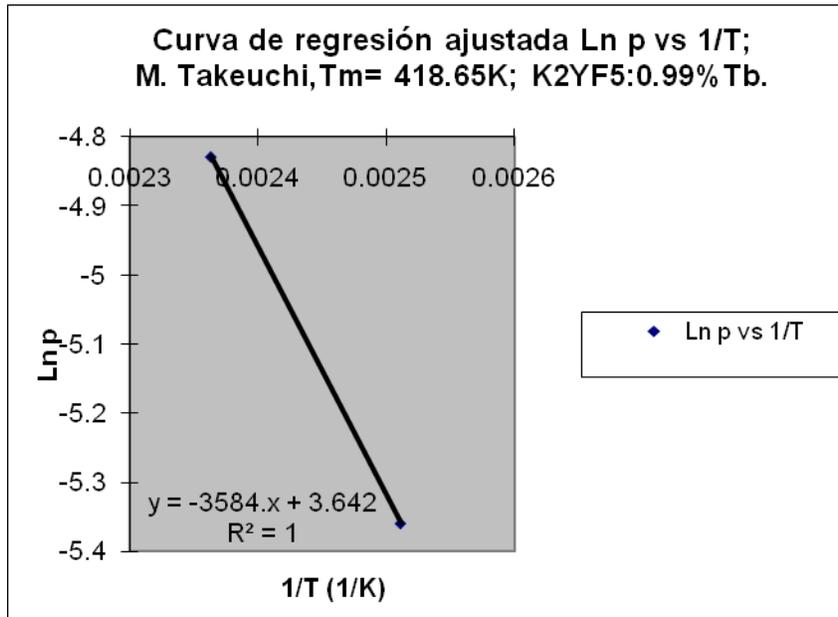


Fig.73. Curva de ajuste de $\text{Ln } p$ vs $1/T$ para el pico $418.65 \text{ }^\circ\text{K}$ del material $\text{K}_2\text{YF}_5: 0.99\% \text{ Tb}$, tratada por el modelo de Takeuchi.

Continuando con el pico ubicado en $T_m = 460.6 \text{ }^\circ\text{K}$.

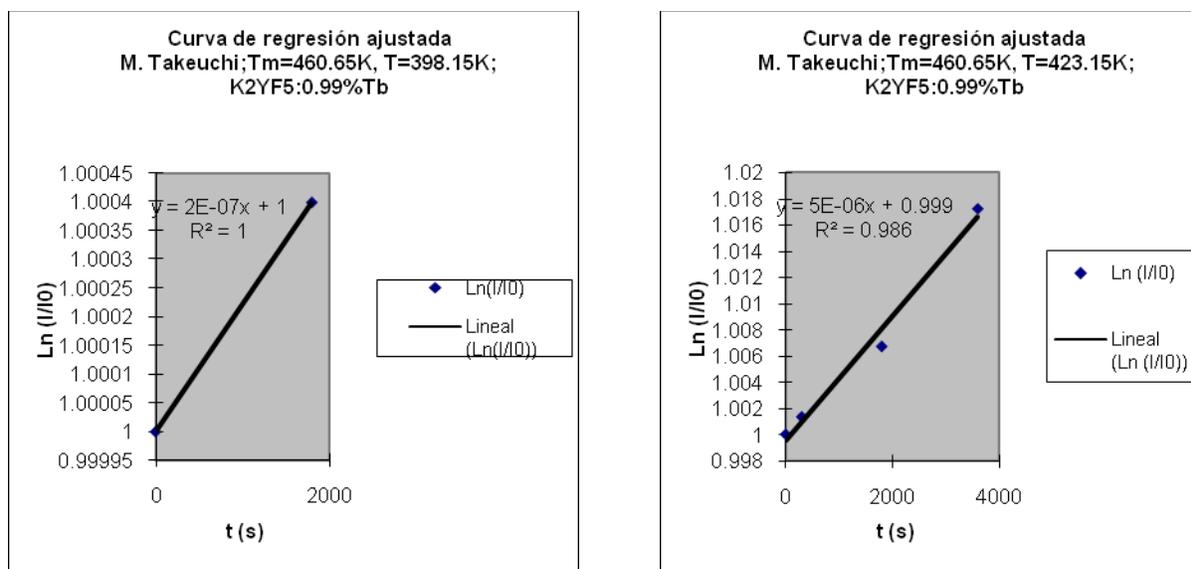


Fig. 74. Curvas de ajuste de $\ln(I/I_0)$ vs t para el pico ubicado en $T_m = 418.65$ °K, del material $K_2YF_5: 0.99\% Tb$, tratadas por el modelo de Takeuchi.

Ajustando ahora el $\ln p$ vs $1/T$ para determinar la energía de activación, reportada en la tabla 56.

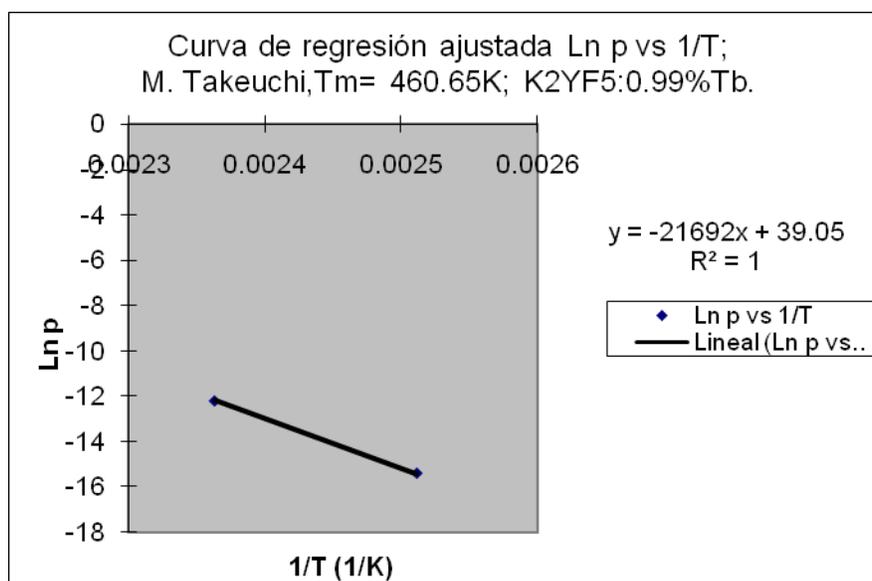


Fig. 75. Curva de ajuste de $\ln p$ vs $1/T$ para el pico 460.65 °K del material $K_2YF_5: 0.99\% Tb$, tratada por el modelo de Takeuchi.

En la tabla 56 se reportan las energías de activación para el material $K_2YF_5: 0.99\% Tb$.

T_m (°K)	Orden cinético	Modelo	Ecuación	Energía (eV)
418.65	2	Garlick-Gibson	$\ln p = -3485.8(1/T) + 2.9787$	0.3
		Takeuchi	$\ln p = -3584.4(1/T) + 3.6424$	0.3
460.65	1.01	Garlick-Gibson	$\ln p = -21692(1/T) + 43.663$	1.9
		Takeuchi	$\ln p = -21692(1/T) + 39.058$	1.9

Tabla 56. Energía de activación del material $K_2YF_5: 0.99\% Tb$ por método de desvanecimiento isotérmico.

XII. CONCLUSIONES.

Se determino la respuesta termoluminiscente del material estudiado al irradiarlo con radiación beta variando la concertación del dopante, encontrándose el siguiente comportamiento resumido en la tabla 11.

Material	T _m (°K)	Respuesta lineal	R ²	Respuesta Poli nómica	R ²
K ₂ YF ₅ : 0.8 % Tb	434.4	111.71x + 788.11	0.9998	0.0006x ² + 110.9x + 882.77	0.9998
	483.9	129.88x + 3182.1	0.9946	-0.014x ² + 150.12x + 819.54	0.9959
	543.7	46.498x - 454.44	0.9992	0.0023x ² + 43.232x - 73.177	0.9995
K ₂ YF ₅ : 0.99 % Tb	419.5	465.9x - 21008	0.9746	0.2163x ² + 152.37x + 15592	0.998
	460.6	280.35x - 13437	0.9751	0.1283x ² + 94.423x + 8267.3	0.9979
	553.4	1428.3x - 34997	0.9889	0.3999x ² + 848.65x + 32671	0.9976

Tabla 11. Respuesta lineal y poli nómica de orden dos para los picos observados de los materiales K₂YF₅: 0.8% y 0.99% Tb.

Observándose que al aumento al dopaje en Tb la respuesta TL a la dosis absorbida por el material es más poli nómica (grado dos) que lineal a grandes dosis, por lo que a dosis pequeñas se puede considerar que existe una respuesta lineal, que es lo ideal para un dosímetro TL, de acuerdo al modelo de Mckeever.

El comportamiento polinómico que presentan el material K₂YF₅ nos habla acerca de una competencia entre trampas, que parece evidente al analizar las curvas de brillo para método de decaimiento isotérmico, donde se puede ver un comportamiento atípico de los picos (véase figuras 34, 35, 36, 42 y 43), durante la etapa de calentamiento, en la cual se espera una estimulación de la trampas saturadas para su liberación, pero lo que se observa es una transferencia de portadores de carga desde la trampa a menor temperatura hacia las trampas a mayor temperatura de estimulación. Esta “Termo-trasferencia” de portadores de carga es un posible indicio de la existencia de mas niveles de banda discretos (los cuales convolucionan en un solo pico de un ancho ω), acomodados en forma de escalera, de tal manera que la energía calorífica adquirida durante el tratamiento termal y su posterior estimulación durante la etapa de calentamiento son suficiente para escalar a bandas de energía mayores hasta su posterior recombinación a niveles debajo del nivel de Fermi, probablemente desde una trampa a mayor temperatura. Aunque aparentemente se presenta esta competencia entre trampas es necesario hacer un estudio detallado de la estructura de bandas del material, las cuales se forman durante el proceso de crecimiento del material y las cuales pueden modificarse por el uso del material, por oxidación, por tratamientos termales o alguna causa.

Por otro lado se observa también que al aumento del dopaje en Tb la sensibilidad por pico del material K₂YF₅ como se ve en las tablas 12, 13 y 14 se incrementa siendo el aumento mas drástico para el tercer pico ubicado alrededor de 548.5 °K, siendo esto una consecuencia directa de la respuesta poli nómica del material. Por tanto se puede concluir que el material K₂YF₅ se puede utilizar como un dosímetro TL.

Se describió las curvas de brillo del material TL K₂YF₅ para tres dopajes en Tb diferentes presentando en general tres picos TL prominentes, los cuales muy probablemente son una convolución de mas trampas, su descripción se resume en general en la tabla 10.

Material TL	Número de picos/ tiempo de desvanecimiento	T_m Prom.(°K)	σ (°K)	I_{max} Prom.(UA)	σ ($\times 10^3$ UA)	Fig. Ref.
K ₂ YF ₅ : 0.8% Tb	3 / 70 hrs.	434.4	14.2	27 772.5	23.4	21.a
		483.9	20.4	40 883.5	35.9	
		543.7	21.2	5071.5	3.7	
K ₂ YF ₅ : 0.9% Tb	3 / 146 hrs.	426.5	6.2	65 902.5	32.9	21.b
		481.6	9.7	144 015.7	56.2	
		544.1	8.9	16 622	2.3	
K ₂ YF ₅ : 0.99% Tb	3 / 408 hrs.	419.5	3.7	218 951.5	18.9	21.c
		460.6	2.5	147 585.5	9.8	
		553.4	2.5	53 738.5	0.1	

Tabla 10. Descripción de los picos para las curvas de brillo TL de los materiales K₂YF₅: 0.8%, 0.9%, 0.99% Tb.

De la descripción anterior se puede concluir que el pico a baja temperatura para los diferentes dopajes del mismo material básicamente corresponde al mismo pico por posición en temperatura, y de la misma manera se puede concluir para los restantes picos. En cuanto a su intensidad por pico se concluye que aumenta al incrementar el dopaje de Tb en el material, y para dopaje menor a 0.99 % Tb el pico intermedio es el de mayor intensidad, y para dopaje de 0.99% Tb el pico de mayor intensidad es el ubicado a mas baja temperatura, por lo que la forma de la curva de brillo es diferente que las de menor dopaje.

Una vez descritas las curvas de brillo del material K₂YF₅, este se caracterizo mediante los parámetros cinéticos de los picos TL arriba reportados. El material fue tratado térmicamente por los métodos de decaimiento isotérmico a temperatura ambiente y temperatura mayor a la ambiente y calcinación del material, con la finalidad de aislar un pico TL y su posterior análisis por el método de la forma del pico mediante los modelos de Grossweiner, Lushchik, Chen primera aproximación, Chen Generalizada y el modelo del incremento inicial, para el calculo de la energía de activación, la cual se usa para calcular el factor pre-exponencial, que ha su vez se usa para calcular el tiempo de vida media.

En la tabla 57 y 58 se resumen los resultados para la energía de activación E_t , el factor pre-exponencial S, el tiempo de vida media τ y la cantidad de estados atrapantes n_0 para el material K₂YF₅: 0.8% Tb.

T_m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
					E_τ (eV)	E_δ (eV)	E_ω (eV)
538.9	1.9	1.2	0.9	1.0	1.2	1.0	1.1
		Grossw S(s ⁻¹)	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹)	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
		1.6x10 ¹⁶	1.5x10 ¹²	1.6x10 ¹²	1.4x10 ¹⁶	4.4x10 ¹²	7.8x10 ¹²
		Grossw τ (s)	Lusch τ (s)	Chen 1 ^{era} τ (s)	Chen Generalizada τ (s)		
		1.8x10 ⁻⁶	1.4x10 ⁻³	1.5x10 ⁻³	1.8x10 ⁻⁵	9.7x10 ⁻⁴	1.1x10 ⁻³
Edos. Atrapantes		Grossw n_0	Lusch n_0	Chen 1 ^{era} n_0	Chen Generalizada n_0		
		1.4x10 ¹¹	0.2x10 ¹⁰	0.2x10 ⁹	1.4x10 ¹⁰	0.2x10 ⁹	0.2x10 ⁹

Tabla 57. Resultados para el calculo de E_t , S, τ y n_0 para el pico ubicado en 538.9 °K del material K₂YF₅: 0.8%.

De la tabla anterior se concluye para el pico TL ubicado en $T_m=538.9$ °K que la energía de activación promedio es 1.1 eV con una dispersión 0.1 eV, un factor pre-exponencial promedio de $5.0 \times 10^{15} s^{-1}$ con una dispersión de $7.8 \times 10^{15} s^{-1}$, un tiempo de vida media para este estado atrapante es $8.5 \times 10^{-4} s$ con una dispersión de $6.8 \times 10^{-4} s$ y 2.6×10^{10} estados atrapantes con una dispersión de 5.7×10^{10} .

T_m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
					E_τ (eV)	E_δ (eV)	E_ω (eV)
476.8	0.9	0.9	1.1	1.1	0.9	0.8	0.9
		Grossw $S(s^{-1})$	Lusch $S(s^{-1})$	Chen 1 ^{era} $S(s^{-1})$	Chen Generalizada $S(s^{-1})$		
		9.6×10^{13}	4.1×10^{14}	1.2×10^{19}	2.5×10^{14}	1.8×10^{14}	2.9×10^{14}
		Grossw $\tau(s)$	Lusch $\tau(s)$	Chen 1 ^{era} $\tau(s)$	Chen Generalizada $\tau(s)$		
		1.2×10^{-4}	1.0×10^{-3}	1.1×10^{-7}	1.4×10^{-5}	2.3×10^{-6}	6.9×10^{-6}
Edos. Atrapantes		Grossw n_0	Lusch n_0	Chen 1 ^{era} n_0	Chen Generalizada n_0		
		0.2×10^{10}	0.2×10^9	2.2×10^{12}	1.8×10^{10}	1.1×10^{11}	3.6×10^{10}

Tabla 58. Resultados para el calculo de E_t , S y τ para el pico ubicado en 476.8 °K del material K_2YF_5 : 0.8%.

De igual forma usando la tabla anterior se concluye para el pico TL ubicado en $T_m=476.8$ °K que la energía de activación promedio es 0.9 eV con una dispersión 0.1 eV, un factor pre-exponencial promedio de $2 \times 10^{18} s^{-1}$ con una dispersión de $4.9 \times 10^{18} s^{-1}$, un tiempo de vida media para este estado atrapante es $2.0 \times 10^{-4} s$ con una dispersión de $4.2 \times 10^{-4} s$ y 3.9×10^{11} estados atrapantes con una dispersión de 8.9×10^{11} .

En la tabla 59 y 60 se resumen los resultados para la energía de activación E_t , el factor pre-exponencial S , el tiempo de vida media τ para el material K_2YF_5 : 0.9% Tb.

T_m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
					E_τ (eV)	E_δ (eV)	E_ω (eV)
541.7	2.3	1.4	1.2	1.3	1.4	1.3	1.4
		Grossw $S(s^{-1})$	Lusch $S(s^{-1})$	Chen 1 ^{era} $S(s^{-1})$	Chen Generalizada $S(s^{-1})$		
		3.8×10^{14}	6.1×10^{13}	8.8×10^{13}	1.2×10^{16}	1.6×10^{14}	7.3×10^{14}
		Grossw $\tau(s)$	Lusch $\tau(s)$	Chen 1 ^{era} $\tau(s)$	Chen Generalizada $\tau(s)$		
		0.01	6.9×10^{-3}	0.01	1.7×10^{-3}	0.02	0.01
Edos. Atrapantes		Grossw n_0	Lusch n_0	Chen 1 ^{era} n_0	Chen Generalizada n_0		
		0.4×10^8	0.8×10^8	0.5×10^8	0.3×10^9	0.2×10^8	0.5×10^8

Tabla 59. Resultados para el calculo de E_t , S y τ para el pico ubicado en 541.73 °K del material K_2YF_5 : 0.9%.

Usando la tabla anterior se concluye para el pico TL ubicado en $T_m=541.7$ °K que la energía de activación promedio es 1.3 eV con una dispersión 0.1 eV, un factor pre-exponencial promedio de $2.2 \times 10^{15} s^{-1}$ con una dispersión de $4.8 \times 10^{15} s^{-1}$, un tiempo de vida media para este estado atrapante es 0.01s con una dispersión de $7.2 \times 10^{-3} s$ y 0.9×10^8 estados atrapantes con una dispersión 1.1×10^9 .

T_m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
					E_τ (eV)	E_δ (eV)	E_ω (eV)
481.6	0.9	0.7	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7
		Grossw S(s ⁻¹)	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹)	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
		0.3x10 ¹⁰	9.1x10 ¹⁰	1.1x10 ¹⁰	0.7x10 ⁹	0.4x10 ⁹	0.6x10 ⁹
		Grossw τ (s)	Lusch τ (s)	Chen 1 ^{era} τ (s)	Chen Generalizada τ (s)		
		0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04
Edos. Atrapantes		Grossw n_0	Lusch n_0	Chen 1 ^{era} n_0	Chen Generalizada n_0		
		0.1x10 ⁸	0.2x10 ⁸	0.2x10 ⁸	0.1x10 ⁸	0.1x10 ⁸	0.1x10 ⁸

Tabla 60. Resultados para el calculo de E_i , S y τ para el pico ubicado en 481.65 °K del material K₂YF₅: 0.9%.

De igual forma usando la tabla anterior se concluye para el pico TL ubicado en $T_m=481.6$ °K que la energía de activación promedio es 0.7 eV con una dispersión 0.08 eV, un factor pre-exponencial promedio de $1.8 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ con una dispersión de $3.6 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, un tiempo de vida media para este estado atrapante es 0.03s con una dispersión de $5.6 \times 10^{-3} \text{ s}$ y 0.2×10^8 estados atrapantes con una dispersión de 0.3×10^7 .

En la tabla 61 se resumen los resultados para la energía de activación E_i , el factor pre-exponencial S, el tiempo de vida media τ para el material K₂YF₅: 0.99% Tb.

T_m (°K)	b	Grossw E(eV)	Lusch E(eV)	Chen 1 ^{era} E(eV)	Chen Generalizada		
					E_τ (eV)	E_δ (eV)	E_ω (eV)
553.4	1.9	1.3	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4
		Grossw S(s ⁻¹)	Lusch S(s ⁻¹)	Chen 1 ^{era} S(s ⁻¹)	Chen Generalizada S(s ⁻¹)		
		3.5×10^{13}	2.2×10^{12}	5.5×10^{12}	2.7×10^{14}	3.1×10^{14}	3.3×10^{14}
		Grossw τ (s)	Lusch τ (s)	Chen 1 ^{era} τ (s)	Chen Generalizada τ (s)		
		0.04	0.1	0.06	0.01	7.8×10^{-3}	0.01
Edos. Atrapantes		Grossw n_0	Lusch n_0	Chen 1 ^{era} n_0	Chen Generalizada n_0		
		0.4×10^8	0.2×10^8	0.2×10^8	0.9×10^8	0.2×10^9	0.1×10^9

Tabla 61. Resultados para el calculo de E_i , S y τ para el pico ubicado en 553.4 °K del material K₂YF₅: 0.99%.

Usando la tabla anterior se concluye para el pico TL ubicado en $T_m=553.4$ °K que la energía de activación promedio es 1.3 eV con una dispersión 0.06 eV, un factor pre-exponencial promedio de $1.6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ con una dispersión de $1.6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$, un tiempo de vida media para este estado atrapante es 0.03s con una dispersión de 0.02s y 0.8×10^8 estados atrapantes y una dispersión 0.7×10^8 .

Continuando con el método de la forma del pico, específicamente el modelo del incremento inicial se reportan los resultados de las energías de activación por pico y tratamiento térmico para el material K₂YF₅: 0.8% Tb, en la tabla 52. De la cual se puede concluir que para el pico en $T_m=428.9$ °K con dispersión 4.9 °K su energía de activación promedio es 1.5 eV con dispersión 0.4 eV calculada por el método de incremento inicial. Y para el pico en $T_m=461.9$ °K la energía de activación es 0.9 eV; y para el pico en $T_m=549.0$ °K con dispersión 3.7 °K la energía de activación es 1.1 eV con dispersión 0.2 eV.

Se observa además al revisar la tabla 52 para el material K_2YF_5 : 0.8% Tb al ser calcinado a 373.1 °K, por diferentes intervalos de tiempo; para el pico en $T_m=428.9$ °K la energía de activación calculada cuando se calino 31 minutos es 1.4 eV y se incrementa hasta 1.9 eV para el material calcinado 64 min, y después disminuye el valor de la energía de activación a 1.7 eV para la calcinada 104 minutos. De lo cual se puede concluir nuevamente que existe un conjunto de estados atrapantes que convolucionan en el pico $T_m=428.9$ °K, y además se presenta la “termo-transferencia” de portadores de carga para la saturación de este estado atrapante, desde los picos a mayor temperatura.

Utilizando los resultados de las energías de activación para el material K_2YF_5 : 0.9% Tb por el método del incremento inicial que se reportan en la tabla 53, se concluye para el pico ubicado en $T_m=426.5$ °K con dispersión 6.2 °K la energía de activación es 1.4 eV con dispersión de 0.1 eV, para el pico en $T_m=492.1$ °K la energía de activación es 1.3 eV y para el pico en $T_m=541.7$ °K con dispersión 11.2 °K la energía de activación es 1.2 eV con dispersión 0.2 eV.

Los resultados de las energías de activación por el método del incremento inicial para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb se reportan en la tabla 54, de donde se concluye para el pico en $T_m=419.5$ °K con dispersión 3.7 °K la energía de activación es 0.8 eV con dispersión 0.1 eV y para el pico en $T_m=555.1$ °K con dispersión 2.5 °K la energía de activación es 0.9 eV con dispersión 0.2 eV.

Una vez calculadas las energías de activación por el método de la forma del pico se calcularon nuevamente por el método de decaimiento isotérmico, para temperaturas mayores a la ambiente, los resultados se reportan en la tabla 55 para el material K_2YF_5 : 0.8% calculadas por el método de decaimiento isotérmico mediante los modelos de Garlick-Gibson de primer orden cinético y de Takeuchi de orden cinético general.

De la tabla 55 y 56 se concluye que la aproximación de decaimiento fosforescente (Garlick-Gibson), para los picos de orden cinético 2 tiene una aproximación del 50%, comparado con el valor encontrado por los métodos de la forma del pico. Por lo que se condensa las tablas 55 y 56 en las tablas 62 y 63.

T_m (°K)	Orden cinético	Modelo	Ecuación	Energía (eV)
422.15	2	Takeuchi	$\ln p = -17802(1/T)+36.195$	1.5
464.15	1.01	Garlick-Gibson	$\ln p = -8665.9(1/T)+8.7614$	0.7
520.15	2	Takeuchi	$\ln p = -19922(1/T)+39.216$	1.7

Tabla 62. Energía de activación del material K_2YF_5 : 0.8% Tb por método de desvanecimiento isotérmico.

T_m (°K)	Orden cinético	Modelo	Ecuación	Energía (eV)
418.65	2	Takeuchi	$\ln p = -3584.4(1/T)+3.6424$	0.3
460.65	1.01	Garlick-Gibson	$\ln p = -21692(1/T)+43.663$	1.9

Tabla 63. Energía de activación del material K_2YF_5 : 0.99% Tb por método de desvanecimiento isotérmico.

En la tabla 64 se resumen los resultados para las energías de activación calculadas por los distintos métodos y modelos para el material K_2YF_5 dopado con Tb.

Material	T_m (°K)	$E_{\text{Ancho Medio}}$ (eV)	T_m (°K)	$E_{\text{Incremento Inicial}}$ (eV)	T_m (°K)	$E_{\text{Decaimiento Isotérmico}}$ (eV)	E_{prom} (eV)
K_2YF_5 : 0.8% Tb	-----	-----	428.9	1.5	422.1	1.5	1.5
	476.8	0.9	461.9	0.9	464.1	0.7	0.9
	538.9	1.1	549.0	1.1	520.1	1.7	1.3
K_2YF_5 : 0.9% Tb	-----	-----	426.5	1.4	-----	-----	1.4
	481.6	0.7	492.1	1.3	-----	-----	1.0
	541.7	1.3	541.7	1.2	-----	-----	1.3
K_2YF_5 : 0.99% Tb	-----	-----	419.5	0.8	418.6	0.3	0.5
	-----	-----	-----	-----	460.6	1.9	1.9
	553.4	1.3	555.1	0.9	-----	-----	1.1

Tabla 64. Energías de activación del material K_2YF_5 dopado con Tb calculadas por diferentes métodos y modelos.

De la tabla 64 se concluye que las energías de activación del material K_2YF_5 : 0.8% Tb, calculadas por los distintos métodos o modelos se observa que los valores entre ellos prácticamente son iguales, además de haber sido el material al que casi todos los métodos pudieron aplicárseles. Al material K_2YF_5 : 0.9% Tb el método de la forma del pico fue el único que se le aplico para la determinación de la energía de activación de los tres picos observados en la curva de brillo, siendo el pico en 541.7 °K donde el valor de la energía de activación muy próximo por el calculo hecho por los dos modelos, mientras para el segundo pico se observa una discrepancia del alrededor del 60% en el calculo por los modelos utilizados. Mientras para el material K_2YF_5 : 0.99% Tb el método de la forma del pico solo pudo ser aplicado al pico en 553.4 °K, pero se observa una discrepancia del aproximadamente 70% entre los modelos, y el método de decaimiento isotérmico fue aplicado únicamente para los picos en 418.6 °K y 460.6 °K, ya que le tercer pico requiere de mayor tiempo de horneado para observar un decaimiento pues durante el monitoreo de los otros picos este aun no se saturaba y continuaba incrementando su intensidad, consecuencia de la “termo-transferencia”.

XIII. RECOMENDACIONES.

El Material utilizado para este trabajo (K_2YF_5 : Tb) se puede considerar un buen dosímetro termoluminiscente para radiación beta a bajas dosis, el cual puede servir para la calibración de otros materiales o equipos. Este material presenta un comportamiento a la respuesta a la dosis absorbida mas lineal a dopajes menores a 0.9 % de la muestra total. El uso que se puede dar con este estudio es en dosimetría personal específicamente para dosimetría del tejido que es la determinación de la dosis absorbida por el tejido a profundidades de 5 – 10 mg/cm². A dosis absorbidas mayores a 0.9 % su utilización se limita a estudios donde se requiera una respuesta a muy altas dosis absorbidas, por un tiempo largo de exposición (como en el caso de la dosimetría ambiental) o donde se tenga una alta sensibilidad (como en el caso de la dosimetría medica, en el radio-diagnostico) o una respuesta supra lineal (como en el caso de la esterilización de comida).

XIV. SUGERENCIAS PARA TRABAJO FUTURO.

Como continuación de este trabajo se pretende primeramente caracterizar el material K_2YF_5 dopado con otras tierras raras y otros porcentajes de terbio, aplicarle nuevamente los métodos y otros diferentes a los aquí aplicados con la intención de buscar el fenómeno de termo-transferencia. Revisar el método de crecimiento del K_2YF_5 , para buscar construir un modelo de las bandas de energía de este material y como son afectadas por el dopaje de las diferentes tierras raras así como su convolución en un solo pico, con la finalidad de dar una explicación a la aparición de la termo-transferencia y a la misma termo-transferencia.

XV. BIBLIOGRAFIA.

1. S.W.S. McKeever, M. Moscovitch and P.D. Toesend, *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and uses*, Nuclear Technology. Publishing, Ashford (1995).
2. R. Chen, G. Fogel and C.K. Lee, *Rad. Protection Dos.* Vol. 65, pp. 63 (1996).
3. J.L. Lawless, R. Chen, D. Lo and V. Pagonis. *J. Phys: Condens Material* **17** (2005) pp. 737.
4. R. Chen and S.W.S. McKeever. *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*. Ed. World Sc.
5. J. Rubio Oca. *Ciencia* (1986) **37** pp. 169.
6. A. A. Kaminski, V. S. Mironov, S. N. Bagaev, N. M. Khaidukov, M. F. Joubert, B. Jaquier, G. Boulon, *Phys. Stat. Sol. A.* **145** (1994) pp177.
7. P. Dorenbos, R. Visser, C. W. Evan Eijk, N. M. Khaidukov, *IEEE Trans. Núcl. Sci.* **40** (4) (1993) pp 388.
8. L. O. Faria, D. Lo, H. W. Kui, N. M. Khaidukov, M. S. Nogueira *Rad. Prot. Dos.* 2004, **112**(3) pp 435.
9. J. Azorín N., N. M. Khaidokov, A. Sánchez R., *Termoluminiscencia de fluoruros dobles dopados con TR*, VII Conf. Int. XVII Cong. Nac. Sobre Dos. De Edo. Sol. (2004) pp 45.
10. A. A. Gallegos C., N. M. Khaidukov, J. Azorín N., *Determinación de los parámetros cinéticos de K_2YF_5 : Tb*, VIII Conf. Int. XVIII Cong. Nac. Sobre Dos. De Edo. Sol. (2005) pp 159.
11. R. Chen, *J. Electrochem. Soc.* **116** (1969) pp 1254.
12. R. Chen, N. Kristianpoller, *Rad. Prot. Dos.* **117** (1986) pp 443.
13. Claudio Furetta, *Handbook of Thermoluminescence* (2003) Ed. World Sc. Publishing Co. Pte. Ltd.
14. F. Sepúlveda M., J. Azorín N., T. Rivera M., C. Furetta, C. Sanipoli, *Parámetros cinéticos termoluminiscentes de la perovskita, $KMgF_3$, activada con lantano*. VII Conf. Int. XVII Cong. Nac. Sobre Dos. De Edo. Sol. (2004) pp. 167.
15. J. Azorín N., N. M. Khaidokov, C. Baillet Guerrero, J. C. Azorín Vega, T. Rivera Montalvo, A. Gallegos Cuellar, J. A. I. Díaz Góngora and P. R. González Martínez, *Radiation effects & Defects in Solids* Vol. 161, No. 8, August 2006, 443-449.
16. Garlick G. F. J. And Gibson A. F., *Proc. Phys. Soc.* **60** (1948) 574.
17. Takeuchi M., Inabe K. And Nanto H., *J. Mater Sci.* **10** (1975) 159.
18. Aramu F., Brovetto P. And Rucci A., *Phys. Lett.* **23** (1966) 308.
19. R. Chen, *J. Appl. Phys.* **40** (1969) 570.
20. J. Zimmerman, *J. Phys. C: Sol. St. Phys.* **4** (1971) 3277.
21. A. Halperin and R. Chen, *Phys. Rev.* **148** (1966) 839.
22. R. Chen and S. W. S. McKeever, *Radiat. Meas.* **23** (1994) 667.
23. E. T. Rodine and P. L. Land, *Phys. Rev. B* **4** (1971) 2701.

24. J. Azorín, A. Gallegos, T. Rivera, J.C. Azorín, N. Khaidukov. Determination of the kinetic parameter of $K_2YF_5:Tb$ from isothermal decay of thermoluminescence. Nucl. Inst. & Met. In Ph. Res. Article in press.

XVI. ANEXO.

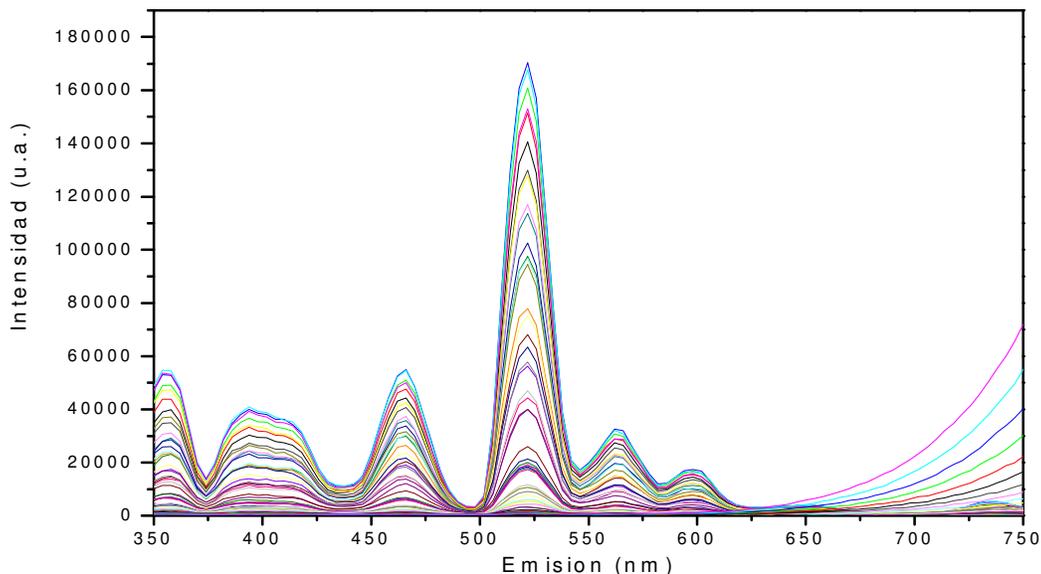


Fig. 65. Espectro de emisión TL del $K_2YF_5:Tb$

El espectro de emisión TL del $K_2YF_5:Tb$ corresponde a un fenómeno de fototransferencia TL en el cual la TL es inducida por las transiciones ópticas de las cargas desde trampas pobladas a vacías. En este caso el material TL fue irradiado inicialmente a una temperatura T_{irr} , posteriormente después de bajarle la temperatura a T_{ill} ; a esta temperatura el material TL es expuesto a luz y después leído para obtener el espectro de emisión TL.

En este caso se repitió el procedimiento experimental varias veces bajando la temperatura de irradiación secuencialmente por cada espectro obtenido, observándose que la intensidad de los picos de emisión disminuye conforme baja la temperatura de irradiación, mientras mantienen la posición de sus máximos, y su ancho medio es casi constante.

El espectro de emisión presenta cuatro picos simétricos en las siguientes longitudes de onda ~ 370 nm, ~ 470 nm, ~ 525 nm y ~ 570 nm, dos asimétricos alrededor de 400 nm y 510 nm, los cuales probablemente sean una convolución de varios picos juntos.

Se puede concluir del mismo espectro que la respuesta de mayor intensidad al ser irradiado con luz de longitud de onda entre 350 nm y 750 nm (Visible y cercano UV) se ubica en ~ 525 nm, además se observan dos picos de igual intensidad y probablemente de ancho medio, ubicados en ~ 370 nm y ~ 430 nm y por tanto este material TL presenta una buena emisión TL al ser irradiado con luz V-NUV.

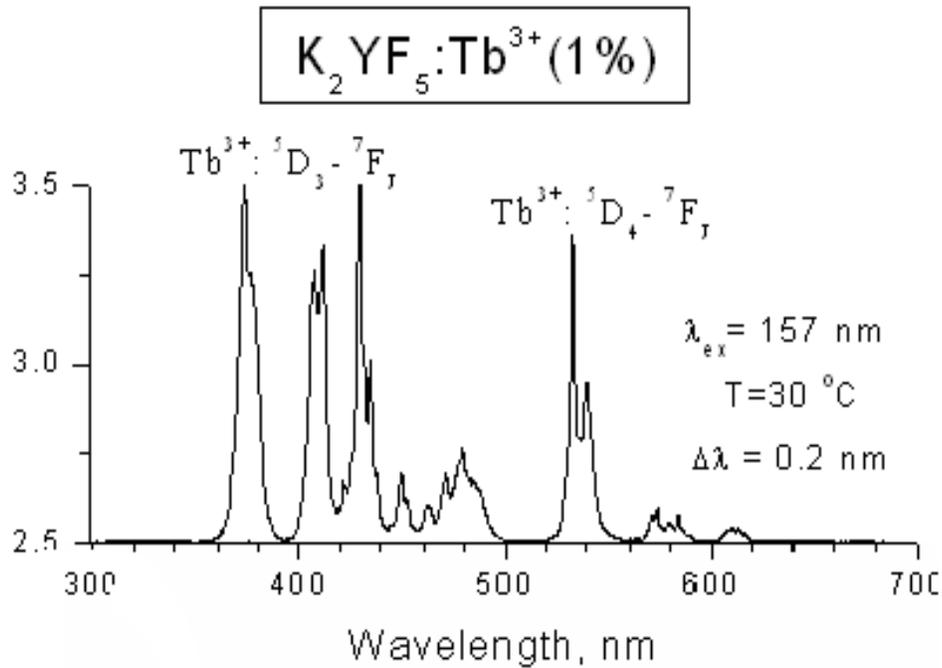


Fig. 66. Espectro fotoluminiscente de K₂YF₅:Tb

El espectro fotoluminiscente del K₂YF₅:Tb³⁺ (1%) es luminiscencia emitida seguida a la absorción de luz (UV) por una transición interna, en este caso la luz excitante fue de λ_{ex} = 157 nm (a T = 30 °C), se presentan cuatro picos asociados a transiciones electrónicas conocidas y mas relevantes en el Tb³⁺ todas con configuraciones ⁵D_J → ⁷F_J : ⁵D_{J=4} → ⁷F_{J=6} ubicada en λ = 488 nm, ⁵D_{J=4} → ⁷F_{J=5} ubicada en λ = 542 nm, ⁵D_{J=4} → ⁷F_{J=4} ubicada en λ = 588 nm y ⁵D_{J=4} → ⁷F_{J=3} ubicada en λ = 620 nm. Estas transiciones se presentan todas de un mismo estado configuracional inicial S=2, L=2 y J=4, mientras el estado configuracional final debido al acoplamiento LS presenta algunos estados degenerados asociados a la configuración permitida S=3, L=3 y J=6 correspondiente ⁷F_{J=6} mientras los restantes estados configuracionales son desdoblamiento de esta configuración electrónica, siendo la ⁷F_{J=3} la de mas baja energía y posiblemente la mas estable.