

Caracterización entre la densidad de maderas amazónicas peruanas mediante la atenuación de la radiación gamma y neutrónica

Javier Gago^{1,3,*}, Marco Munive¹, Alcides López^{2,3}, Moisés Acevedo⁴, Boris Villa⁴,
Juan Rodríguez^{2,3}

¹ Div. de Investigación y Desarrollo, Inst. Peruano de Energía Nuclear, Lima 41, Perú

² Div. De Energía y Desarrollo, Inst. Peruano de Energía Nuclear, Lima 41, Perú

³ Facultad de Ciencias, Univ. Nac. De Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210 Rimac, Lima 25, Perú

⁴ Facultad de Ciencias Forestales, Univ. Nac. Agraria La Molina, Lima 12, Perú

Resumen

Se presenta los resultados de la caracterización de la densidad de muestras de madera, mediante el estudio de los coeficientes de atenuación tanto de la radiación gamma, usando una fuente de cobalto 60 de 75 mCi de actividad, como de neutrones usando una de las facilidades del reactor RP-10 operando a 320 kW de potencia y un flujo neutrónico de $5,6 \cdot 10^6$ ($n \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$). Los resultados de la medición de los coeficientes de atenuación muestran que la densidad se encuentra influenciada por la humedad y el tipo de madera principalmente. Las mediciones muestran valores satisfactorios al compararse con los valores de referencia y los experimentales. La densidad influye considerablemente con los factores relacionados con la calidad de la madera. Este trabajo siendo parte de proyectos mayores, busca desarrollar sistemas autónomos y portátiles de tecnología nuclear que puedan identificar el tipo de madera, sus propiedades y características para un control adecuado en la explotación y el comercio.

Abstract

This investigation show the work developed in the characterization of the density of woods by means of the study of the Attenuation Coefficients of the gamma radiation, using a source of cobalt 60 of 75 mCi of activity and neutrons using the Reactor RP10 as source of neutrons working at 320 kW and using a flow of $5,6 \cdot 10^6$ ($n \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), the results of the measurement of the Attenuation Coefficients show that the density is influenced by the humidity and the type of wood mainly, so for, the measurements of the density are in agreement with referential and experimental values. As the density has strong influence with important related factors with wood quality, this work being part of big projects that seek to develop autonomous and portables systems of nuclear technology that can identify the type of wood, properties and characteristics for an adequate control in the exploitation and trade.

1. Introducción

La importancia actual de la innovación tecnológica es que sirve para mejorar la productividad, el manejo y la industria forestal, incrementando los beneficios del bosque. Ello exige experimentar con nuevas metodologías que permitan determinar, entre otras, la densidad de la madera *in situ*, siendo esta información de mucha utilidad para el conocimiento y manejo óptimo para su aprovechamiento.

Como se sabe, los coeficientes de atenuación tanto de la radiación gamma como de neutrones, en diversas especies de maderas varían significativamente, dependiendo de la humedad, tipo de madera y otros detalles, como las impurezas, defectos, cavidades, etc. La información de la densidad dependiente de la energía, permite un reconocimiento de

la madera tanto en forma extensa como localizada [1,2].

El objetivo del presente estudio es determinar la relación de los coeficientes de atenuación de la radiación lineal μ promedio con las densidades de las especies amazónicas: Catahua Amarilla (*Hura Crepitans L.*), Mohena (*Aniba Amazonica Meiz*), Ojé Blanco (*Ficus insípida*) y Capirona (*Calycophy Spruceanum Be*) aplicando técnicas nucleares.

2. Descripción de los ensayos

Para la puesta en operación de los equipos densitométricos con radiaciones gamma y neutrones aplicados a maderas, se han desarrollado dos técnicas que comprenden la densitometría gamma y la neutrografía.

* Correspondencia autor: jgago@ipen.gob.pe

2.1 Densitometría gamma

Cuando un haz de fotones colimado incide en un material, parte de la radiación es atenuada o absorbida, esta atenuación de la radiación esta relacionada con las propiedades físicas del material, especialmente por su densidad y su correspondiente coeficiente de atenuación. Esta propiedad se expresa mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot L} \quad \dots\dots\dots (1)$$

De esta ecuación se obtiene:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{-L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- I: Intensidad de la radiación emergente del material (fotones/s).
- I₀: Intensidad de radiación incidente en el material (fotones/s).
- μ: Coeficiente de Atenuación Lineal de la Radiación (cm⁻¹).
- L: Espesor del material atravesado por el haz radioactivo (cm).

El coeficiente de atenuación lineal se expresa en función de la densidad y el coeficiente de atenuación másico de acuerdo a la ecuación (3):

$$\mu = \mu_p \cdot d \quad \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

- μ_p: Coeficiente de atenuación másico del material (cm²/g)
- d: Densidad del material (g/cm³)

El coeficiente de atenuación másico depende de la energía de la radiación incidente y la naturaleza química del material absorbente [3].

De esta manera se conoce el coeficiente de atenuación másico y el espesor de material atenuador, se podría determinar su densidad mediante la ecuación (4):

$$d = \frac{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\mu_p \cdot L} \quad \dots\dots\dots (4)$$

2.2 El Densitómetro por rayos gamma

El densitómetro gamma está compuesto de una serie de dispositivos electrónicos cuya función es controlar la intensidad de

radiación incidente, así como medir la intensidad de la radiación emergente del material en estudio, para ello cuenta con un detector y una fuente radioactiva principalmente (Figura 1). En este caso, se observa que la dirección de los rayos gamma es paralela a la dirección de las fibras de la madera.

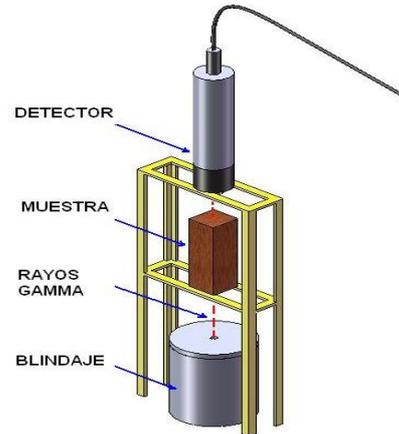


Figura 1: Representación esquemática de la instalación para el ensayo de densitometría gamma.

a) Fuente radioactiva

De la gama de radioisótopos comercialmente disponibles, para estudios de este tipo son útiles los siguientes: Cobalto-60, Cesio-137, Americio-241 e Iridio-129[4]. En la presente investigación se usó una fuente de cobalto 60 de 75 mCi de actividad.

b) Detector

El detector empleado fue el de Ioduro de Sodio, cuyo funcionamiento se basa en el fenómeno de centelleo, el cual emite fotones en el rango visible cuando el cristal es bombardeado por una partícula o fotón. El NaI tiene ciertas ventajas como su alta tasa de producción de luz (centelleos) por cada interacción, tiene además una excelente linealidad en su respuesta y un alto número atómico en sus constituyentes [3].

c) Registro de datos

Para la medida de la densidad se usó el dispositivo multicanal UniSpec marca Canberra, el cual luego de detectar una señal a una determinada energía, envía la señal física al software Genie 2000, logrando obtenerse en la pantalla el espectro de transmisión de la muestra en estudio.

2.3 Neutrografía

Es una técnica de *ensayo no destructivo* similar a la radiografía común de rayos X. En ésta técnica, en vez de emplear los rayos X o rayos gamma se emplea un haz de neutrones proveniente de una fuente de neutrones, en este caso de un reactor nuclear: Cuando los neutrones inciden sobre un objeto, este modifica el haz de acuerdo a las interacciones producidas por la estructura interna del objeto, el haz modificado, que lleva la información producida durante la interacción, se hace incidir sobre un dispositivo cerrado que contiene una placa fotográfica y una placa convertidora de Dy-Gd, el cual traduce punto a punto la señal correspondiente a la cantidad de neutrones transmitidos en fotones de luz, estos fotones impresionan la placa fotográfica unida a la placa convertidora en un chasis durante un tiempo previamente determinado, registrándose así la imagen latente del objeto irradiado (Figura 2).

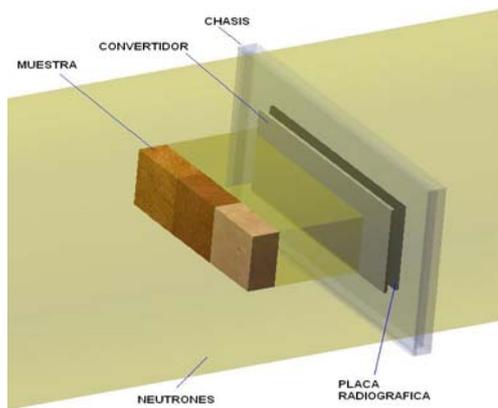


Figura 2: Esquema del dispositivo para los ensayos con neutrografía.

4. Desarrollo y resultados

Las maderas analizadas en este trabajo han sido la Capirona, la Mohena y la Catahua, preparadas en bloques con dimensiones de $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}^3$, la longitud de 15 cm corresponde a la orientación paralela a las fibras de la madera. La densidad experimental de las maderas empleadas para la calibración del equipo se presenta en la Tabla 1.

4.1 Medición de la densidad de la madera por irradiación gamma

Se han obtenido los espectros de atenuación de rayos gamma de las maderas Capirona, Catahua y Mohena, tal como podemos apreciarlos en la figura 3a. Se observa la existencia de dos picos muy pronunciados, característicos del Cobalto 60 cuyas energías son 1.17 y 1.33 MeV, en las cercanías de estos picos las curvas se confunden entre sí, haciendo difícil distinguir el efecto de la atenuación de la medición. Una mejor información de la atenuación se puede observar entre 67.5 y 1023 keV (figura 3 b) donde nos permite apreciar que la curva correspondiente a la Capirona se encuentra en la parte inferior respecto a las curvas correspondientes a la Catahua y a la Mohena, esto nos indica que la Capirona ofrece una mayor atenuación seguida de la Catahua y la Mohena, información relacionada directamente con la densidad de cada una de ellas.

La información obtenida mediante los espectros de atenuación de rayos gamma se procesan para determinar su coeficiente de atenuación lineal mediante la ecuación (2). En este caso I e I_0 representan el número de cuentas de los fotones transmitidos e incidentes.

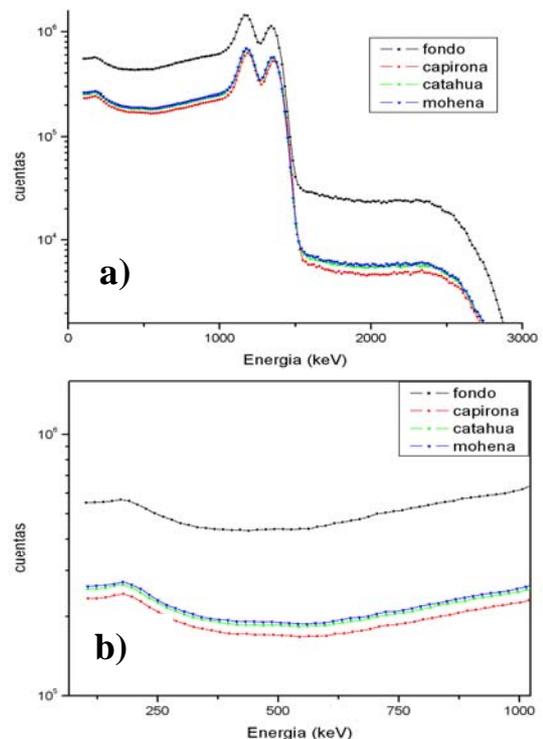


Figura 3: Espectros de atenuación de la Capirona, Catahua y Mohena, a) rango amplio y b) entre 67.5 y 1023 keV

En la figura 4 se muestran la variación de los coeficientes de atenuación lineal (cm^{-1}) medidos por transmisión de la radiación gamma para las maderas: Capirona, Catahua y Mohena, la línea de color rojo correspondiente a la Capirona está por encima de la línea verde (Catahua) y de la línea azul (Mohena).

Tabla 1: Densidades medidas experimentalmente de las maderas estudiadas.

Muestra	Densidad (g/cc)
Catahua seca	0.622
Catahua húmeda	0.648
Mohena seca	0.629
Mohena húmeda	0.664
Capirona seca	0.844
Capirona húmeda	0.920

Nota: El término "seco(a)" se refiere a la madera a condiciones ambientales 20°C y 1 atm.

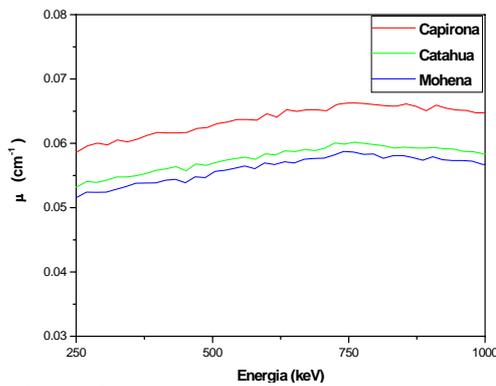


Figura 4: Coeficiente de atenuación lineal (cm^{-1}) medido por transmisión gamma, para la Capirona, Catahua y Mohena.

En la figura 5 se aprecian las diferentes coeficientes de atenuación másicos calculados a partir de las pendientes de cada relación lineal entre la densidad y el coeficiente de atenuación lineal.

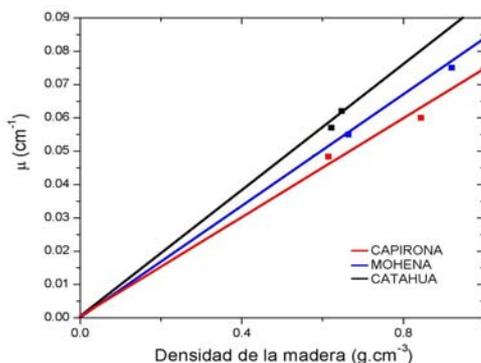


Figura 5: Variación del coeficiente de atenuación lineal con respecto a la densidad de las maderas medidas con radiación gamma.

Posteriormente, se realizó ensayos con madera húmeda debido a que los rayos gamma tienen mayor dispersión con los componentes hidrogenados. Los espectros obtenidos, son mostrados en la figura 6. El espectro de la madera húmeda muestra el incremento de la atenuación, tal como puede observarse en la figura 6 a), donde la absorción de la Capirona representado con la línea roja es menor a la de la Capirona húmeda (color azul). De la misma manera, en la figura 6 b), para la Catahua seca (color verde) se observa disminuida con respecto a la Catahua húmeda (color azul). Los procedimientos para humedecer la madera fueron realizados de acuerdo a la norma *ASTM D 570 – 95* [6, 7].

Los resultados experimentales de las mediciones de los coeficientes y la densidad de la madera por irradiación gamma se muestran en la tabla 2.

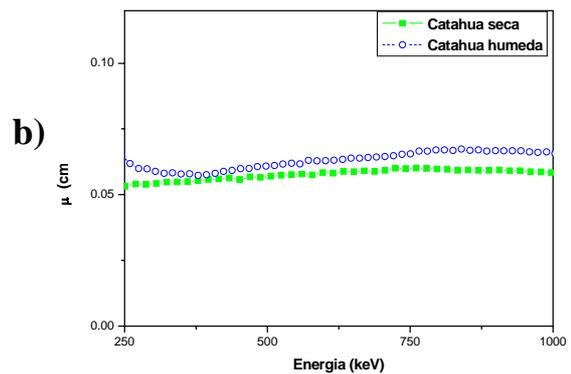
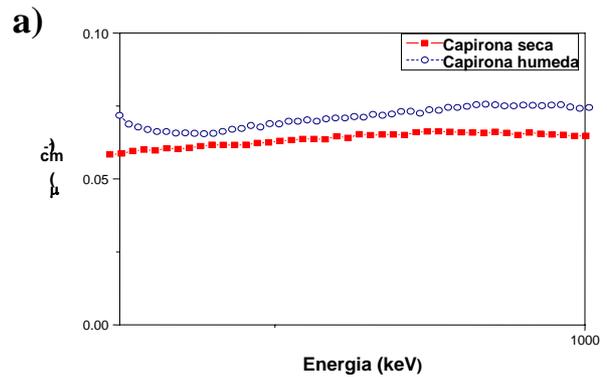


Figura 6: Espectros de transmisión comparando muestras secas y húmedas, a) en azul Capirona húmeda, rojo Capirona seca; b) en azul Catahua húmeda, en verde Catahua seca.

Como referencia en otros estudios, los valores del coeficiente de atenuación lineal obtenidos tuvieron una atenuación másica de 0.18 y 0.20 para la madera seca y húmeda,

respectivamente, en la madera Pinus oocarpa[4]; asimismo, otros estudios señalan un valor de 0.187 cm²/g para la madera Pinus Radiata[5].

Tabla 2: Resultados experimentales obtenidos por irradiación gamma.

Muestra	μ (cm ⁻¹)	μ_p (cm ² .g ⁻¹)	Densidad Calculada (g.cm ⁻³)
Catahua seca	0.057	0.095	0.60
Catahua húmeda	0.062	0.095	0.653
Mohena seca	0.055	0.087	0.632
Mohena húmeda	-	0.087	-
Capirona seca	0.06	0.073	0.822
Capirona húmeda	0.072	0.073	0.986

4.2 Medición de la densidad de la madera por neutrografía

Complementariamente, se realizó ensayos neutrográficos de las maderas, teniendo como fuente de neutrones al reactor nuclear RP-10 operando a 320 kW de potencia y usando un flujo neutrónico de 5,6*10⁶ (n s⁻¹cm⁻²), el tiempo de exposición al flujo neutrónico fue de 20 minutos, obteniéndose con ello los registros neutrográficos de la Serie 1 (Capirona, Catahua y Mohena húmedas) y de la Serie 2 (Ojé Blanco, Cumala y Capirona secas). En ambas series se observa el cambio de grises de la Capirona, siendo la seca ligeramente menos absorbente que la húmeda. En la figura 7 se aprecian los diferentes coeficientes de atenuación másicos calculados a partir de las pendientes de cada relación lineal entre la densidad y el coeficiente de atenuación lineal, los valores medios de los coeficiente de atenuación de la radiación lineal neutrónica (cm⁻¹) se observan en la tabla 3.

A partir de los negativos neutrográficos se obtuvieron los correspondientes perfiles de intensidades a la región correspondiente a una recta MN, tal como se muestra en la figura 8 a, dichos perfiles se han asociado a las atenuaciones sufridas por los neutrones las mismas que se muestran en la figura 8 b.

En la Serie 1 se observa que la Capirona tiene mayor oposición al paso de los neutrones por tanto en el positivo de la placa neutrográfica y tomando en cuenta la escala de grises se observa más oscura que las otras maderas que tienen menor densidad.

Tabla 3: Coeficientes de absorción neutrónica y densidad de la Serie 1 y la Serie 2.

Muestras	μ Coef. Abs. Neut. (cm ⁻¹)	μ_p Coef Abs Másico cm ² /g	Densid ad δ g.cm ⁻³
	Serie 1 Madera seca		
Capirona	0.049	0.054	0.907
Catahua	0.052	0.08	0.650
Mohena	0.054	0.082	0.658
Ojé Blanco	0.065	-	-
Serie 2 Madera seca			
Cumala	0.057	-	-
Capirona	0.047	0.054	0.870

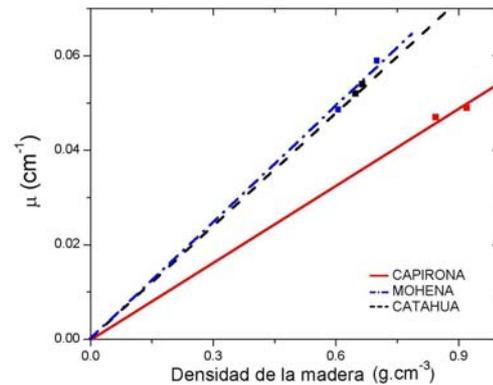


Figura 7: Variación del coeficiente de atenuación lineal con respecto a la densidad de las maderas medidas por neutrografía.

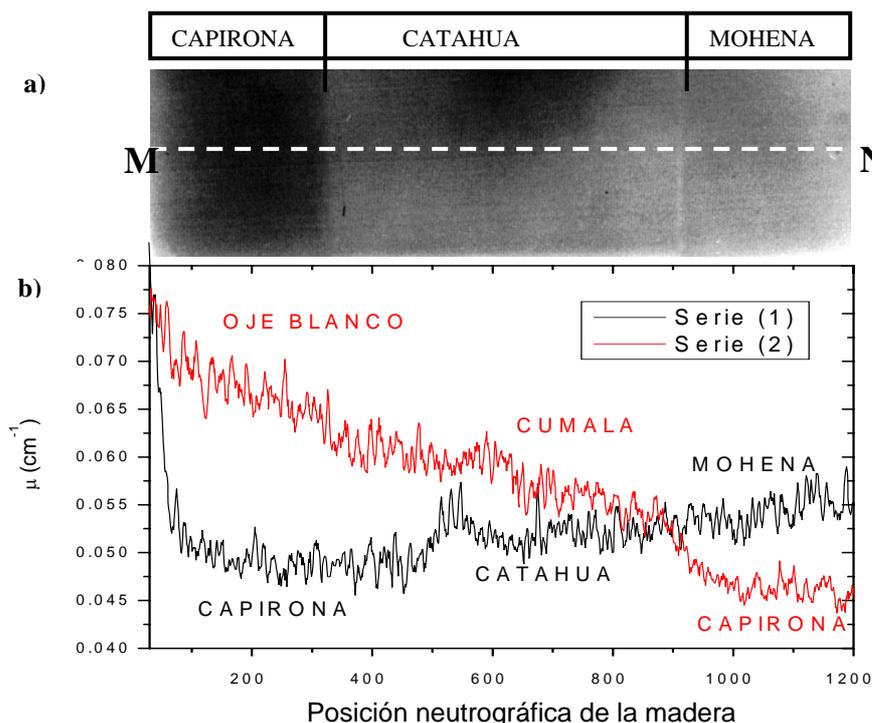


Figura 8: a) Positivo neutrográfico de la Capirona, Catahua y Mohena húmedas (Serie1), b) Espectros de atenuación lineal medido por transmisión neutrónica para la (Serie1), comparado con otras maderas secas Oje Blanco, Cumala y Capirona (Serie 2).

Tabla 4: Medición de la densidad por diferentes técnicas.

Muestra	Densidad (g.cm ⁻³)		
	Medición directa	Medición Con Rad. Gamma	Medición con Neutrones
Catahua seca	0.622	0.588	0.65
Catahua húmeda	0.648	0.639	-
Mohena seca	0.664	0.663	0.658
Capirona seca	0.844	0.822	0.870
Capirona húmeda	0.92	0.986	0.907

5. Conclusiones

La presente investigación ha permitido establecer las bases para el desarrollo de medición de la densidad en madera por rayos gamma y neutrones. Los ensayos de densitometría por rayos gamma usando una

fente de cobalto 60 de 75 mCi de actividad, así como una de las facilidades del reactor RP-10 operando a 320 kW de potencia y un flujo neutrónico de $5,6 \cdot 10^6$ (n s⁻¹cm⁻²) nos brindan resultados importantes en la medición de los coeficientes de atenuación (Tabla 4).

Esta investigación ha permitido establecer las correlaciones entre los coeficientes lineales de atenuación y las densidades por medio de los coeficientes másicos de absorción de las maderas, coeficientes másicos que caracterizan a cada una de ellas.

6. Agradecimientos

Se agradece la colaboración del Ing. Genaro Rodríguez, Ing. Mario Mallaupoma, Ing. Alvaro Aguirre, Ing. Walter Cruz, a los Ingenieros Marco Linares, Jhonny Vargas y bióloga Kety León por su apoyo en las actividades del proceso de irradiación. Al Dr. Julio Santiago, Dr. José Solís por las fructíferas discusiones sobre los pormenores del trabajo. Asimismo, al personal del reactor RP-10 por su apoyo para los ensayos de neutrografía.

7. Bibliografía

- [1] Macedo A, Vaz CMP, *et al.* Wood density determination by X- and gamma-ray. *Tomography Holzforschung*. 2002; 56(5): 535-540.
- [2] Woods FW, Hough WA, O'Neal D, Barnet J. Gamma ray attenuation by loblolly pine wood: An investigation of integral counting. *Forest Science*. 1965; 11(3):341-345.
- [3] Knoll GF. Radiation detection and measurement. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons Inc; 1979.
- [4] Feraz ESB, Aguilar O. Gamma-ray attenuation technique for determining density and water content of wood samples. *IPEF*. 1985 Aug; 30:9-12.
- [5] Karsulovic JT, Dinator MI, Morales J, Gaete V, Barrios A. Determinación del diámetro del cilindro central defectuoso en trozas podadas de pino radiata (*Pinus radiata*) mediante atenuación de radiación gamma. *Bosque*. 2005 ; 26(1):109-122.
- [6] ASTM “Standard Test Method For Water Absorption of Plastics” *ASTM D 570* – 95.
- [7] Gago J, López A, Acevedo M, Rodríguez J. Radiación gamma en el mejoramiento de las propiedades físicas de compuestos polímero –madera. En: Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe Científico Tecnológico 2005. Lima: Perú; 2006. p. 62-67.