

CAPITULO 5. RESULTADOS.

5.1 Irradiación de las Piezas Dentales

La irradiación del esmalte dental de Aguazuque y Checua fue realizado en un equipo estándar de irradiación de ^{60}Co , en el Laboratorio de Fuente Gamma, en el instituto de Minas y Energía, Ingeominas, a temperatura ambiente y a una tasa de dosis promedio de 8Gy/min. Fueron irradiadas 16 alícuotas en total, 8 pertenecientes a Aguazuque (AG) y 8 de Checua (CH) en un rango comprendido entre los 50 y 740Gy. En las tablas 5.1 y 5.2 se muestran los resultados obtenidos de las irradiaciones de las piezas dentales.

AGUAZUQUE		
Alícuota	Dosis (Gy)	Incertidumbre (Gy)
AG1	54	5
AG2	108	11
AG3	148	13
AG4	220	18
AG5	301	24
AG6	451	36
AG7	576	45
AG8	743	58

Tabla 5.1 Resultados de las irradiaciones de las alícuotas de Aguazuque (AG).

CHECUA		
Alicuota	Dosis (Gy)	Incertidumbre (Gy)
CH1	59	5
CH2	118	11
CH3	182	15
CH4	222	18
CH5	347	28
CH6	490	39
CH7	582	46
CH8	740	57

Tabla 5.2 Resultados de las irradiaciones de las alícuotas de Checua (CH).

Como puede observarse las irradiaciones son a altas dosis, debido a que por ser una unidad estándar y no de uso clínico, no se pueden asegurar bajas dosis. Las tasas de dosis son altas en cada uno de las vecindades a la unidad y por tanto una dosis del orden de 1Gy por ejemplo implica tiempos de exposición casi imposibles para el equipo y solo aseguraría una gran incertidumbre a estas dosis. Por otra parte, aunque estas dosis son altas nos basamos en la hipótesis de que no existirían problemas de saturación de la señal EPR ya que en la literatura se reportan saturaciones de la señal del CO_2^- hasta incluso los 8kGy (Hoffmann et al, 2003), en la próxima sección se mostrará la respuesta EPR obtenidos en estos rangos de dosis.

Para la obtención de las dosis suministradas a cada alícuota se usaron dosímetros Gamma Crome YR; para esto, cada alícuota era unida a un dosímetro al momento de la irradiación para corroborar la dosis suministrada por el equipo.

5.2 Respuesta Paramagnética.

La respuesta paramagnética de las muestras de esmalte irradiadas se realizó por medio de Espectroscopia de Resonancia Paramagnética Electrónica (EPR). Los espectros fueron tomados en el laboratorio de EPR de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, a

temperatura ambiente en un espectrómetro Bruker ESP 300, banda X y onda continua, operando a frecuencia de modulación de 100 kHz, frecuencia de microonda de 9.78 GHz y potencia de microondas de 0.2 mW.

5.2.1 Respuesta Natural

Antes de obtener la respuesta EPR de las muestras irradiadas, fue medido el espectro natural de las muestras de Aguazuque y Checua. Para esto se tomó una alícuota de cada muestra y se midió su espectro EPR antes del proceso de irradiación; este paso permitió la medición de la señal natural que es generada por los elementos radiactivos como ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K y la radiación cósmica en el esmalte durante el periodo burial del fósil (Grun, 1989).

En las figuras 5.1 y 5.2 se observa el espectro natural obtenido para las muestras de Aguazuque y Checua, estos espectros presentan señales con factores $g_{\perp}=2,0025$ y $g_{\parallel}=1,993$ que son asociados con la especie paramagnética CO_2^- , en geometría axial, reportado ya en la literatura por sus excelentes resultados en dosimetría y datación (Ikeya, 1993; Grun 1989; Kinoshita et al, 2002).

Encontrar esta señal natural es importante porque nos permite saber que existe una respuesta paramagnética del material, dando un buen punto de partida para la construcción de la Curva de Respuesta de Dosis.

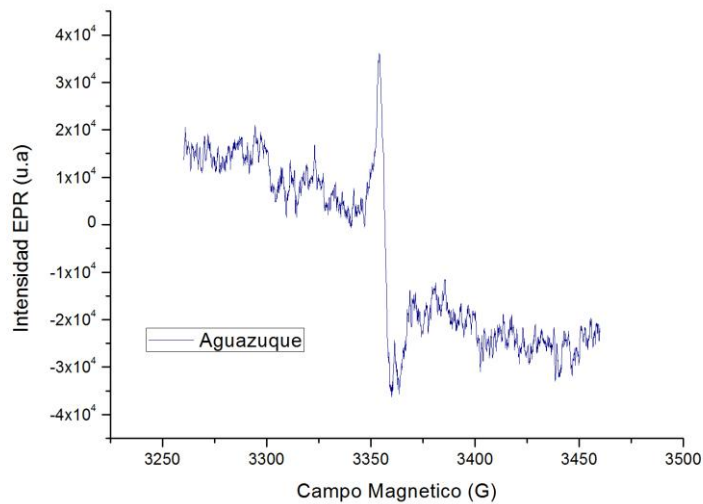


Figura 5.1 Espectro EPR natural de la muestra de Aguazuque.

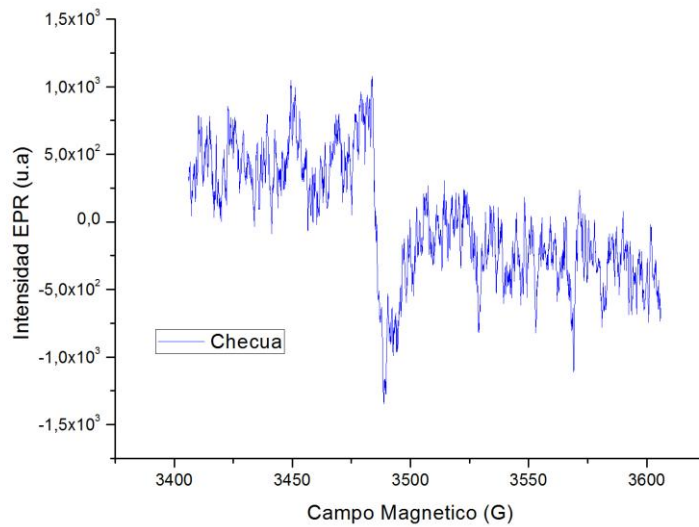


Figura 5.2 Espectro EPR natural de la muestra de Checua.

5.2. 2 Respuesta Paramagnética de la Muestras Irradiadas.

Los espectros EPR de las muestras sometidas a radiaciones ionizantes de ^{60}Co fueron tomados una semana después de las irradiaciones, esto con el fin de asegurar la estabilidad de la señal a medir y además, evitar la detección de otras posibles señales inducidas por la irradiación y que podrían interferir con nuestra señal de interés. El decaimiento térmico de otras señales que pudieron ser inducidas por la radiación artificial es mas rápido que la referente al CO_2^- (IAEA, 2002) por esta razón es recomendable esperar una semana después de las irradiaciones. Señales diferentes al CO_2^- generadas por radiación artificial carecen de interés para nuestro trabajo.

Todas las muestras mostraron un incremento de la intensidad de la señal EPR con la dosis. El espectro registrado fue claro y conveniente para la lectura de la altura pico a pico; esta última fue tomada como propiedad física dependiente de la dosis. Es decir, la altura pico a pico de la señal EPR del esmalte dental fue usada para construir la Curva de respuesta de Dosis. Lo anterior es válido cuando el ancho pico de la señal de EPR no cambia con la dosis suministrada.

En las figuras 5.3 y 5.4 puede observarse el aumento de la señal EPR con la dosis para las muestras de Aguazuque y Checua irradiadas entre 50 y 350Gy.

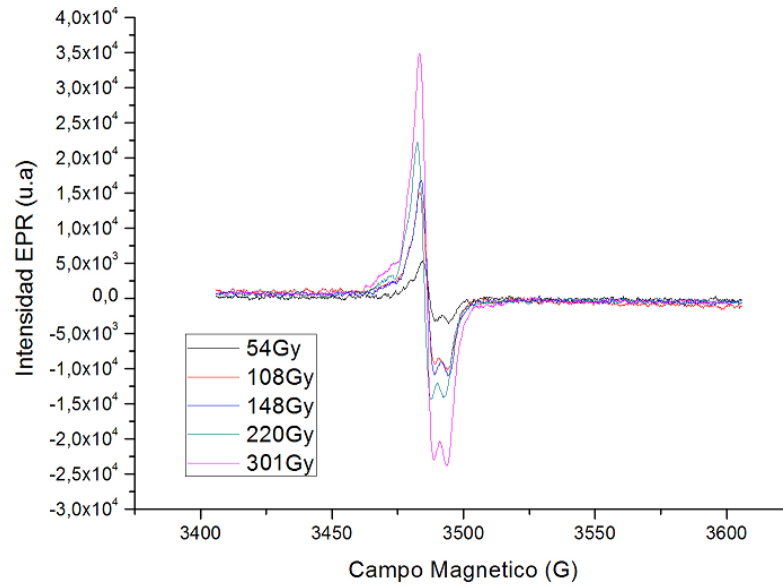


Figura 5.3. Aumento de la intensidad EPR con la dosis para las muestras de Aguazuque.

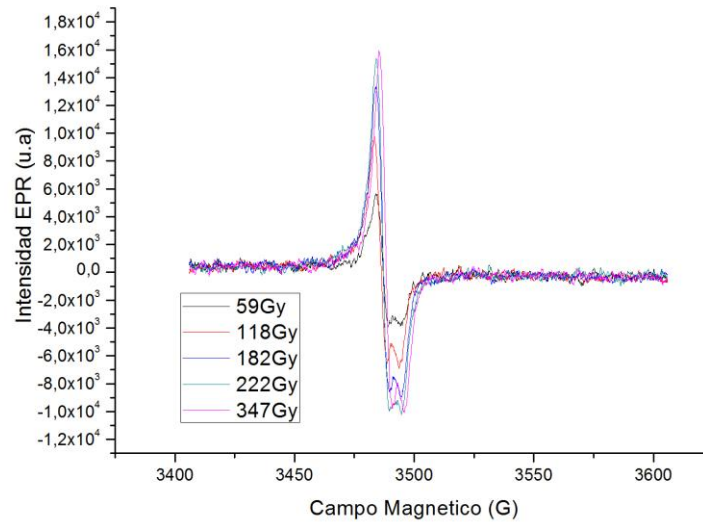


Figura 5.4. Aumento de la intensidad EPR con la dosis para las muestras de Checua.

5.3 Curva de Respuesta de Dosis de Aguazuque y Checua

Como ya lo habíamos mencionado la altura pico a pico fue tomada como la característica física dependiente de la dosis para construir la Curva de Respuesta Dosis de ambas piezas dentales. Estudios anteriores muestran que la mejor manera de caracterizar la respuesta en función de la dosis de un material es usando la altura pico a pico del espectro EPR, pues, aunque el área bajo la curva del espectro de absorción es proporcional a la cantidad de defectos que se producen por radiación ionizante, esta no sería el mejor indicador, ya que como ya se conoce, la señal obtenida por el equipo es la primera derivada del espectro de absorción, y por ende, si se desea obtener el área bajo la curva se debe integrar numéricamente la señal obtenida; Además factores inevitables en la medición, como el ruido, perjudican notoriamente esta integración (Caputi et al, 1996).

En la figura 5.5 y 5.6 se observa la Curva de Respuesta de Dosis obtenidas para los dientes de Aguazuque y Checua, estas curvas fueron construidas usando el método de dosis aditiva.

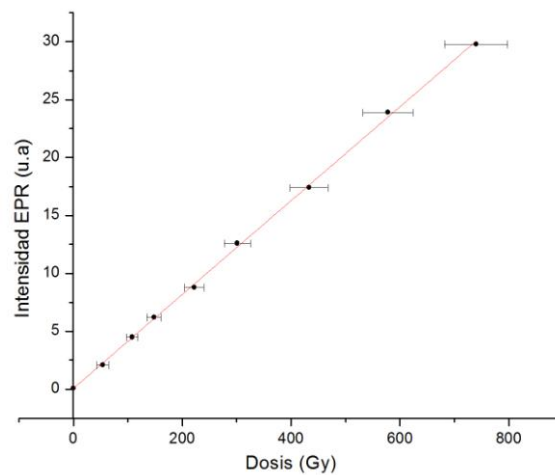


Figura 5.5 Curva de Respuesta de Dosis de la Pieza dental de Aguazuque.

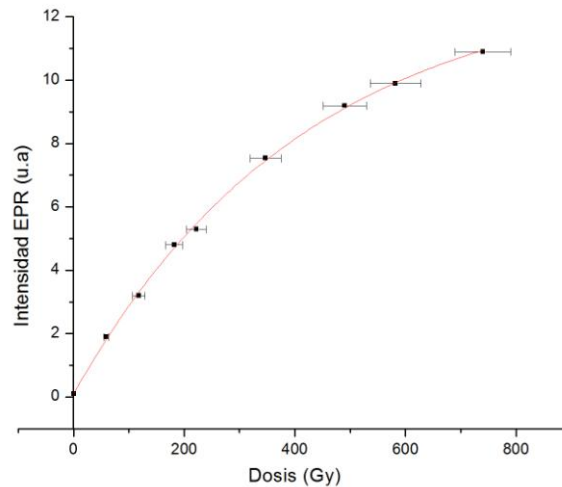


Figura 5.6 Curva de Respuesta de Dosis de la Pieza dental de Checua.

En estas curvas puede observarse una notoria diferencia entre las tendencias obtenidas para Aguazuque y Checua, ya que la primera obedece a una tendencial lineal con un coeficiente de correlación de 0.994, mientras que para el caso de Checua se obtiene una relación exponencial creciente con coeficiente de correlación de 0.998. Esta diferencia puede explicarse desde el punto de vista de la concentración de vacancias que puede ser mayor en la muestra de Aguazuque, mientras que para la muestra de Checua se empieza a alcanzar un número máximo de defectos por radiación, produciendo por ende, que se llegue a la saturación a menores dosis de radiación.

Tanto el comportamiento exponencial como el lineal son correctos y aceptables (Grun, 1989; Ikeya 1993) sobre todo si se trabaja en un rango de dosis alto, como en el que nos encontramos trabajando, ya que podríamos estar llegando a la saturación de las muestras. En la literatura es normal observar que las tendencias son de tipo lineal, sin embargo hay que tener en cuenta que estos trabajos muestran resultados en un rango de dosis comprendido entre los 5 y 100Gy (Kinoshita et al, 2008), el comportamiento exponencial para el CO_2^- se ha observado a dosis altas, de hasta 8kGy dependiendo de la edad de las muestras (Hoffmann et al, 2003).

5.3.1 Calculo de Dosis Equivalente

Las dosis equivalentes de los sitios Aguazuque y Checua fueron obtenidas por medio de la extrapolación a intensidad de señal cero, de la curva de respuesta de dosis de cada una de las muestras- La dosis equivalente encontrada en este trabajo, correspondiente al periodo burial para la muestra de Aguazuque, fue de $D_E = (2,10 \pm 0,10) \text{ Gy}$. En el caso de Checua la dosis equivalente encontrada fue de $D_E = (3,20 \pm 0,08) \text{ Gy}$. El valor de la incertidumbres asociadas a estas dosis equivalentes fue obtenido por ajuste de mínimos cuadrados de funciones lineales y exponenciales (Ardila M, 2007).

5.4 Estimación de la Tasa de Dosis Media Anual

La estimación de la tasa de dosis media anual a la que fue expuesta la muestra durante el periodo burial, fue dividida en dos partes importantes. En la primera parte se encontró la contribución a la tasa de dosis por radiación cósmica; para esto fueron usadas las ecuaciones y los gráficos de Prescott and Hutton y más adelante se detallará como fueron encontrados estos valores. En la segunda parte se encontró la contribución de la tasa de dosis debida a los elementos radiactivos presentes en el sedimento alrededor de la muestra; en este paso se usó espectrometría de rayos gamma en el que se encontraron las concentraciones en partes por millón (ppm) de las principales fuentes de emisión radiactiva (U, Th y K). También fue usado el software ROSY que facilitó los cálculos de la tasa de dosis una vez conocidos los resultados de espectrometría gamma.

5.4.1 Tasa de Dosis Cósmica (D_c)

Para conocer el valor de la tasa de dosis media anual debido a la radiación cósmica, fueron utilizadas las tablas y gráficos de Prescott and Hutton. Primero se calculó el valor de la tasa de dosis a nivel del mar D_{c0} en función de la profundidad de la muestra usando la siguiente expresión (Prescott et al, 1982):

$$D_{c0} = 0,21e^{(-0,070x+0,0005x^2)}$$

En esta expresión D_{c0} está en mGy/a y x representa la profundidad de la muestra y está en $hgcm^{-2}$ ($100gcm^{-2}$). En nuestro caso las profundidades en las que fueron encontrados los entierros corresponden a 72 cm para Aguazuque y 35cm para Checua, lo que es equivalente a $1,86hgcm^{-2}$ y $0,93hgcm^{-2}$ (Prescott et al, 1982). Usando esta expresión los valores encontrados para D_{c0} fueron de **(0,18 ± 0,01) mGy/a** para el caso de Aguazuque y **(0,20 ± 0,01) mGy/a** para Checua.

Luego se procedió a calcular la tasa de dosis cósmica D_c en función de la altura de los sitios arqueológicos (h), para esto fue utilizada la expresión (Prescott et al, 1982):

$$D_c = D_0 \left[F + J e^{(h/H)} \right]$$

En donde las altitudes, h y H son expresadas en km, los valores de F , J y H son parámetros que fueron encontrados a partir de la figura 5.7, que se encuentra en función de la latitud geomagnética (λ) del sitio que a su vez puede ser calculada usando la expresión:

$$\text{sen}\lambda = 0,203\cos\theta\cos(\varphi - 291) + 0,979\text{sen}\theta$$

Donde θ y φ , representan la latitud y longitud geográfica del sitio.

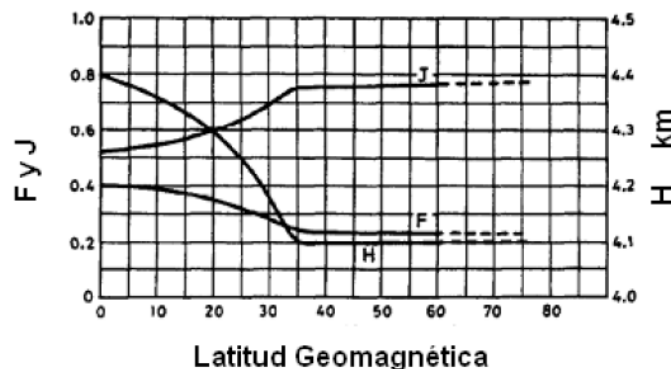


Figura 5.7. Valores de F , J y H , en función de la latitud geomagnética (λ) (Prescott et al, 1994).

Para las latitudes y longitudes dadas en la sección 4.1 (4° 37' de latitud Norte y 74°17' de longitud al Oeste de Greenwich para Aguazuque y 5° 04' de latitud norte y 73° 53' de longitud al este de Greenwich para Checua) y para las alturas de los sitios Aguazuque y Checua (2256 m y 2600m) se encontraron los valores de tasa de dosis cósmica D_c de los sitios de Aguazuque y Checua cuyos valores corresponden a $(251 \pm 15) \mu\text{Gy/a}$ y $(260 \pm 15) \mu\text{Gy/a}$.

Se observa que estos valores no defieren de manera notoria, esto puede explicarse en el hecho que los sitios arqueológicos se encuentran en zonas geográficas semejantes.

Estos valores presentan una coincidencia con los valores de radiación cósmica reportados por otros autores (Kinoshita et al 2007; Baffa, 2007)

5.4.2 Resultados de Espectrometría Gamma

Los resultados de las concentraciones de U, Th y K de las muestras de sedimento de Aguazuque y Checua determinadas por medio de Espectrometría Gamma se muestra en la tabla 5.3.

MUESTRA	CONCENTRACION (ppm)		
	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K
Aguazuque	1.86 ± 0.14	3.72 ± 0.22	1.66 ± 0.10
Checua	1.44 ± 0.10	3.78 ± 0.23	0.77 ± 0.05

Tabla 5.3 Concentraciones de U, Th y K de la muestras de sedimento de Aguazuque y Checua.

Una anotación importante es que estos resultados solo son para las concentraciones de elementos radiactivos encontrados en el sedimento circundante a los entierros. Existen también concentraciones de estos elementos en la dentina, al interior del diente, que en cierta forma contribuirían a la tasa de dosis media anual recibidas por las piezas dentales, sin embargo esta concentración interna de materiales radiactivos solo se da en periodos de tiempo relativamente grandes, puntualmente, en periodos superiores a los 20000 años (Grün,

1989; Jonas, 1997). Los registros que se conocen de los entierros de este trabajo comprenden una época que va desde los 8500 a 3000 años antes del presente (A.P) (Groot, 1992; Correal, 1990) que está dentro del intervalo de la época de cazadores - recolectores en Colombia, por lo que podemos considerar despreciables las concentraciones de elementos radiactivos al interior del diente. Otros reportes en la literatura (Kinoshita et al, 2008; Hefne et al, 2002) han considerado esta aproximación obteniendo muy buenos resultados en las edades calculadas por ellos de otros materiales.

5.5 Calculo de la Edad

Para el cálculo de edad fue utilizado el software ROSY, en el fueron introducidas las concentraciones de elementos radiactivos obtenidas por espectrometría gamma (lo cual es suficiente para el software para calcular la tasa de dosis suministradas por estos materiales), las tasas de dosis cósmicas calculadas en base a Prescott and Hutton, descrita anteriormente y las dosis equivalentes obtenidas por la técnica EPR.

En la tabla 5.4 y 5.5 se observan los resultados de la tasa de la dosis media anual total obtenida usando el software ROSY, para Aguazuque y Checua.

	Alfa ($\mu\text{Gy/a}$)	Beta ($\mu\text{Gy/a}$)	Gamma ($\mu\text{Gy/a}$)	Cosmica ($\mu\text{Gy/a}$)	Gamma+Cosmica ($\mu\text{Gy/a}$)
Dentina	0.00	0.00	-	-	-
Esmalte	0.00	0.00	-	-	-
Cemento	0.00	0.00	-	-	-
Sedimento	0.00	46.55	347.31	-	-
Uranio	0.00	34.54	188.50	-	-
Torio	0.00	12.01	158.81	-	-
Potasio	-	0.00	0.00	-	-
Total	0.00	46.55	347.31	251.00	598.31

Tasa de dosis total ($\mu\text{Gy/a}$) = 644.86

Tabla 5.4. Resultados de la tasa de dosis media anual obtenida por ROSY para el sitio Aguazuque.

	Alfa ($\mu\text{Gy/a}$)	Beta ($\mu\text{Gy/a}$)	Gamma ($\mu\text{Gy/a}$)	Cosmica ($\mu\text{Gy/a}$)	Gamma+Cosmica ($\mu\text{Gy/a}$)
Dentina	0.00	0.00	-	-	-
Esmalte	0.00	0.00	-	-	-
Cemento	0.00	0.00	-	-	-
Sedimento	0.00	43.34	342.65	-	-
Uranio	0.00	29.76	162.72	-	-
Torio	0.00	13.58	179.93	-	-
Potasio	-	0.00	0.00	-	-
Total	0.00	43.34	342.65	260.00	602.65

Tasa de dosis total ($\mu\text{Gy/a}$) = 645.99

Tabla 5.5. Resultados de la tasa de dosis media anual obtenida por ROSY para el sitio Checua.

Las contribución de partículas alfa en la tasa de dosis media anual es considerada nula ya que en los tratamientos realizados con HCl al 10% se aseguró la remoción de al menos 50 μm de capa de esmalte, profundidad máxima alcanzada por partículas alfa en materiales con densidades como la del esmalte (IAEA, 2002).

Las edades obtenidas para los entierros fueron calculadas utilizando los valores tabulados arriba, la dosis equivalentes encontrada por EPR y la ecuación 3.1 y fue para el caso de Aguazuque de **3256 \pm 196 años A.P** y de **5021 \pm 202 años A.P** para el caso de Checua.

Cabe anotar que el software ROSY calcula estas edades usando tres modelos de acumulación de Uranio diferentes: el modelo lineal, el modelo temprano y una combinación de ambos (Ikeya, 1993; Grun, 1989; Fattibene et al, 2010). Estos modelos establecen de que forma se acumula el uranio en el diente: en el modelo lineal se establece que esta acumulación aumenta a la misma tasa al transcurrir el tiempo y el modelo temprano establece que la acumulación se da en un corto tiempo, relativo a la edad del diente y después de este pequeño lapso de tiempo permanece constante. La edad usando estos tres métodos resultó la misma tanto para Aguazuque como para Checua. Este resultado es coherente si tenemos en

cuenta que consideramos despreciable la acumulación de elementos radiactivos al interior del diente.

5.5.1 Análisis

La edad obtenida en la muestra de Aguazuque lleva una relativa correspondencia con los resultados estratigráficos realizados a muestras de sedimento del sitio; ya que en profundidades comprendidas entre los 50 y 80 cm los análisis de suelo muestran edades entre los 2800 y 3400 años A.P (Correal, 1990). La pieza dental de Aguazuque fue encontrada a una profundidad promedio de 70 cm y el valor de incertidumbre que posee la edad calculada por EPR permite que exista una relativa correspondencia con el análisis estratigráfico ya que estas edades están contenidas en la incertidumbre de la edad EPR de esta muestra.

En el caso de Checua, no se conoce ningún registro de datación directa al individuo al cual pertenecía la pieza dental ni tampoco una datación directa al sedimento en el que se encontraba el entierro, por lo que es difícil confrontar la edad del entierro obtenida por EPR. Sin embargo, en la literatura se establece una comparación entre el tipo de suelo en el que se encontró el entierro de Checua con los suelos de Aguazuque y otros sitios arqueológicos como Chía, cuyos límites cronológicos oscilan entre los 5000 y 3000 años A.P (Groot, 1992); por tanto basándose en los resultados obtenidos para Checua podemos apoyar la afirmación de que la edad de este suelo es en promedio de 4000 años.

Es importante destacar los resultados obtenidos por la técnica EPR, que si bien es un método muy conocido en el mundo, solo hasta ahora se le da importancia en Colombia. Los resultados de datación de sitios arqueológicos en Colombia se han basado básicamente en datación radiocarbónica (^{14}C) lo que ha hecho difícil la datación directa de individuos ya que aún no se cuenta con este equipo; además en los yacimientos arqueológicos no siempre puede contarse con muestras orgánicas para usar este método. La datación EPR es un método de datación directo y absoluto, es decir puede estimarse la edad del individuo a partir de una pieza propia del mismo (como su esmalte dental) y no de su ambiente próximo que por

diferentes fenómenos físicos y geológicos pueden ser cronológicamente diferentes a nuestro individuo de interés.

Los resultados aquí obtenidos contribuyen a unir los eslabones de la larga cadena de nuestra historia y en la hay mucho por hacer, ya que nuestro país posee un rico pasado prehispánico y colonial. Este trabajo, por tanto, se ha convertido en un esfuerzo pionero que pretende impulsar y optimizar la técnica EPR en Colombia y con ello la datación de nuestros antepasados.

CONCLUSIONES

Las edades obtenidas para los entierros de Aguazuque y Checua fueron de **3256 ± 196 años A.P** y de **5021 ± 202 años A.P**. Estos resultados muestran una relativa correspondencia con los resultados estratigráficos obtenidos para estos sitios.

La datación EPR promete muchas aplicaciones futuras en Colombia y puede convertirse en una herramienta vital y óptima para la datación de muestras arqueológicas de nuestro país, rica en su pasado prehispánico.

Las grandes ventajas que ofrece este método son su disponibilidad, su bajo costo, fácil manejo y su eficiencia.

Bibliografía.

Ardila M. 2007. Física Experimental, Segunda Edición. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Física. Bogotá.

Caputi, K.I., Niebieskikwiat, D.G, 1996. Utilización de L- Alanina como dosímetro de radiación mediante EPR, Septiembre de 1996.

Correal, G. 1990. Aguazuque. Evidencias de Cazadores Recolectores y Plantadores en la Altiplanicie de la Cordillera Oriental, Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales, Banco de la Republica. Bogota.

Fattibene P, Callens F. 2007. EPR dosimetry with tooth enamel: A review. Applied Radiation and Isotopes 68 (2010) 2033–2116.

Groot, A. 1992. Checua: Una secuencia Cultural Entre 8500 y 3000 Años Antes del Presente. Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales, Banco de la Republica. Bogotá.

Grün, R. (1989). "Electron Spin Resonance (ESR) dating." Quaternary International 1:65-109.

Hefne, J., Yamani, A., Al-Dayel, O., Ikeya, M., Al-Osaimi, S., (2002). "ESR Dating of Tooth from Pre-Islamic Siting Saudi Arabia". Advances in ESR Applications. 18, 119-121.

Hoffmann D, Woda C, Mangini A. 2003. Equivalent Dose Determination In Foraminifera: Analytical description of the CO₂ - signal Dose- Response Curve. Radiation Measurements 37 (2003) 95 – 101.

Ikeya, M. (1993). New applications of electron spin resonance: Dating, Dosimetry and

Microscopy, World Scientific Publishing Company, Singapore.

International Atomic Energy Agency. (2002). Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a coordinated research project. IAEA-TECDOC-1331. Vienna.

Jonas, M., (1997). "Concepts and Methods of ESR dating". *Radiat. Meas.* 27, 943-973.

Kinoshita, A., Figueiredo, A.M.G., Felice, G.D., Lage, M.C.S.M., Guidon, N. Baffa, O., (2008b). "Electron spin resonance dating of human teeth from Toca da Santa shelter of São Raimundo Nonato, Piauí, Brazil". *Nucl. Instrum. Meth B.* 266, 635-639.

Kinoshita, A., Figuty, L., y Baffa, O. (2006). "Electron Spin Resonance Dating of Shells from the Sambaqui (Shell Mound)Capelinha, São Paulo, Brazil." *Brazilian Journal of Physics*, vol. 36, no. 1A.

Prescott, J.R., Hutton, J.T., (1994). "Cosmic ray contributions to dose-rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations". *Radiat. Meas.* 23, 497-500.

Rink, W.J., (1997). "Electron Spin Resonance (ESR) dating and ESR applications in quaternary science and Archaeometry". *Radiat. Meas.* 27, 975-1025.