



TRAZADORES ATMOSFÉRICOS BE-7, K-40 Y PB-210 EN LA CIUDAD DE PANAMÁ

¹OMAYRA PÉREZ C., ²BERNARDO FERNÁNDEZ G.

¹Universidad de Panamá, Panamá, Panamá
omayra.perezc@up.ac.pa

²Universidad de Panamá Panamá, Panamá
revista.sciencia@up.ac.pa

RESUMEN

Las estaciones de radionucleidos del Sistema Internacional de Vigilancia del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (TPCE), fueron designadas originalmente para la detección de un ensayo nuclear. Sin embargo, más allá de ese objetivo original la red tiene un interés científico y ambiental, por sus aplicaciones civiles. Por lo que en este trabajo se busca relaciones dentro del cuadro de fenómenos complejos, entre la detección de Be-7, Pb-210 y K-40 con los parámetros climáticos y meteorológicos en la ciudad de Panamá, como información valiosa en la modelización de la circulación de los contaminantes atmosféricos, en caso de la propagación de una nube radiactiva cerca del sitio de la estación. Se sugiere que son indicadores de parámetros más bien globales para el Be-7 y locales para el Pb-210 y el K-40.

PALABRAS CLAVES: CTBTO, radionucleidos, radiactividad, cosmogónicos, ensayos nucleares.

INTRODUCCIÓN

La paz mundial es fundamental para la sobrevivencia de la humanidad, por lo que se requiere la eliminación inmediata de las armas de destrucción masiva. Una de esas armas es la nuclear. Tanto el control de la producción de la bomba como el desmantelamiento de los arsenales nucleares requieren de una inspección *in situ* que afecta la soberanía de los países. Por ello se llegó a un acuerdo tácito entre los países, que consiste en iniciar el proceso hacia la paz, con la vigilancia del cumplimiento de la supresión total de los ensayos nucleares. Estos

últimos lo realizan los estados con el propósito de hacer estratégica el arma nuclear. La radiactividad emitida durante los ensayos nucleares contamina el ambiente, además de ser un indicador de que al hacer un ensayo se está dispuesto como estado, a poner en peligro la paz mundial.

El Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (TPCEN o CTBT por sus siglas en inglés de Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty) fue puesto para la firma y ratificación de los países, por la Naciones Unidas, en 1996, después de tomar conciencia de que más de 2 000 ensayos nucleares no solo amenazan la paz mundial, sino que ponen en peligro el ambiente. Por ejemplo, entre otras cosas, debido a estos ensayos, aumentó sustancialmente el contenido de Cesio-137 en la atmósfera (Bennett, 1990; Oliva-Martínez y otros 1995), el tritio en el agua (Rozanski y otros, 1991), etc. Entre las disposiciones del tratado está la instalación de 337 estaciones para la vigilancia del cumplimiento de la prohibición de ensayos nucleares, de las cuales 80 son de monitoreo de radiactividad en partículas suspendidas en el aire (con radioelementos relevantes producto de ensayos nucleares), 40 de detección de gases radiactivos (principalmente la del xenón radiactivo) productos de las explosiones nucleares y además, el establecimiento de 16 laboratorios de análisis de radiactividad de muy baja actividad, como respaldo a las estaciones de monitoreo de la radiación. Este conjunto de estaciones forma el *Sistema Internacional de Vigilancia de la Radiactividad producto de Ensayos Nucleares* (de ahora en adelante SIV de la organización del CTBT).

El tratado le asignó a Panamá dos estaciones, una de partículas y una de gases. Dentro de las aplicaciones civiles del SIV de la organización del CTBT, está el apoyo a la vigilancia ambiental regional, nacional o local con los datos obtenidos a través de dicha red y que están respaldados por equipamiento de alta calidad y confiabilidad. El SIV del CTBT durante el evento nuclear de Fukushima, el 11 de marzo de 2011, contribuyó con información confiable, sobre la propagación de la nube radiactiva que se esparció por todo el planeta (Haupt y Mützelburg, 2011). En esa ocasión la organización del tratado (CTBT) pudo dar información, a los responsables de Fukushima, sobre lo que se estaba detectando a varios kilómetros del accidente, gracias a la excelente localización y calidad de los equipos e instrumentos para la detección de las estaciones. Por ejemplo, los datos de la estación JP38 (Japón-Partículas) que forma parte del SIV del CTBT fueron muy útiles para tomar las medidas de protección radiológica en el área. A la vez, los datos obtenidos a través del SIV del CTBT permitieron

la simulación de la propagación de la nube radiactiva, información necesaria para los países del globo sobre el alcance del evento. En particular, a partir de esta simulación se conocieron las características de la nube que se propagaba en dos capas climáticas, la que está entre cero y 0,50 km y entre 2,0 y 5,0 km del suelo. Los resultados de las mediciones de la contaminación propagada por la nube, en las diferentes estaciones, sirvió de prueba de la capacidad de detección del SIV del CTBTO en caso de un evento, no solo producto de un ensayo nuclear, sino como resultado de un accidente (incidente) radiactivo. Los productos del SIV del CTBTO serán mejores en la medida que se estudien, en las distintas estaciones, la climatología y la meteorología local en correlación con la propagación de la nube.

En cuanto a la calidad de los datos generados por el SIV del CTBTO existe un estudio a través de varios años, del trazador atmosférico Na-24, con la finalidad de evaluar la distribución de la radiactividad del Na-24 y su detección por las distintas estaciones. En este estudio, que cubre un tiempo superior a cinco años, se encontró mas de 3 000 detecciones de Na-24 entre todas las estaciones con un valor promedio de $12 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, concentración superior al MDC (Matthews, 2011). Con los resultados obtenidos se determina la influencia de la latitud en la concentración de radioisótopos naturales, para las distintas partes de la atmósfera, sobre todo al nivel del mar y a 18 km de altitud (figura 1). En 10 de las estaciones con las mas altas frecuencias en la detección se vió una relación (inversa o directa) con la época del año y, en función de la latitud (ver cuadro 1). Lo que significa que hay buen acoplamiento entre las capas atmosféricas y la aspiradora de la respectiva estación, por movimiento (verticales) de las masas de aire en unas estaciones más que en otras de la misma latitud, por debajo de los 5,0 km de altitud.

Los resultados del trabajo de Matthews (2011), llevan a concluir que la estación PAP50, por sus características atmosféricas, en la región de latitud 0-10 es una de la más adecuadas para detectar los trazadores que se producen en la atmósfera por debajo de 5,0 km como el Na-24. Con este trabajo sugerimos lo mismo sobre la estación PAP50 tomando en cuenta la detección del K-40 (primordial) proveniente del mar y del Pb-210 que es el resultado de la erosión de rocas de origen terrestre (primordial).

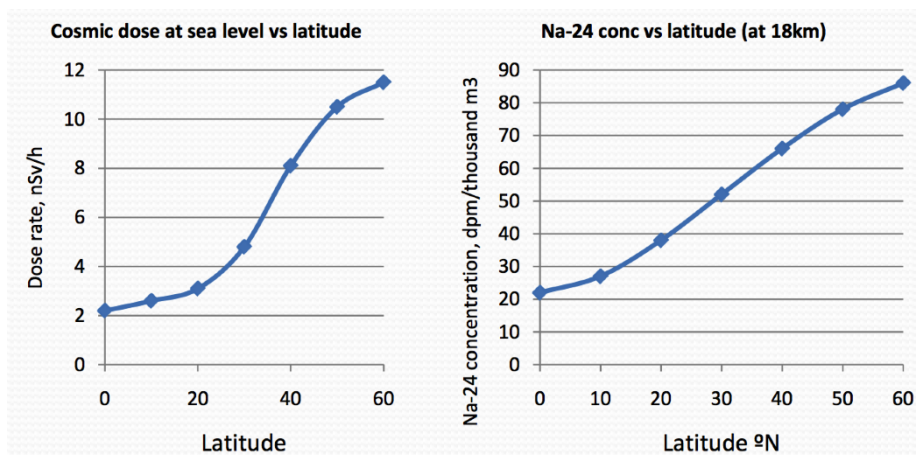


Fig. 1. Variación, con la latitud, de la presencia de Na-24 y la dosis de origen cósmico (Matthews, 2011).

Para sustentar dichos resultados se presenta, a continuación, el estudio de la detección del Be-7, el K-40 y el Pb-210, por varios años como trazadores atmosféricos, en la estación PAP50. En vista de que los climas y los comportamientos meteorológicos no son fenómenos deterministas, estos resultados se deben ver como indicadores de los parámetros climáticos y meteorológicos necesarios en las simulaciones que se hacen con programas (software) de modelación de la propagación de nubes radiactivas.

Cuadro 1. Grupo de estaciones de la red del CTBTO.

Estación	Latitud	Lugar
PAP 50	8.9° N	Panamá
FJP 26	18.0° S	Fiji
USP 72	28.3° N	Florida, USA
GBP 68	37.0° S	Tristan da Cunha
NZP 47	35.1° S	New Zealand
NZP 46	44.0° S	Chatham Island
RUP 60	53.1° N	Petropavlovsk, Rusia
USP 71	55.2° N	Alaska
RUP 61	56.7° N	Dubna, Rusia
USP 76	64.7° N	Alaska

El Be-7 como trazador atmosférico

La mayoría de los autores llama climatología al estudio del comportamiento atmosférico a mediano plazo, que implica una escala temporal de decenas de años. Por otro lado, la meteorología se ocupa del comportamiento a escalas de tiempo menores. Hay variables,

además del tiempo, como, por ejemplo, la radiación cósmica que influyen significativamente en las características físicas y químicas de la atmósfera.

La radiación cósmica recibida por la atmósfera terrestre es dependiente de la latitud geográfica. Depende de la no homogeneidad del campo magnético terrestre, que como sabemos, desvía las partículas cargadas de la radiación cósmica. La magnitud del campo magnético puede ir de un máximo de 70% del total en los polos hasta un 7% en el Ecuador. También puede depender de la época del año (estaciones) y del ciclo día-noche (Love, 2008).

Los rayos cósmicos inciden básicamente sobre la baja estratosfera (66%) y alta troposfera terrestre (33%) y al colisionar con las partículas de la atmósfera, producen elementos cosmogénicos como el Be-7 y el Na-24 que son isótopos radiactivos naturales (Zanis, 2002). Los isótopos formados a partir de los rayos cósmicos que más han interesado en los estudios atmosféricos son el C-14, el Be-7, el Na-22, el Na-24 y el tritio.

El mecanismo de creación del Be-7 natural que se forma en la atmósfera es por espalación, y ocurre al incidir los protones y los neutrones de los rayos cósmicos, muy energéticos, sobre los núcleos ligeros del aire como el carbón ($Z = 6$), el nitrógeno ($Z = 7$) y el oxígeno ($Z = 8$), tal como se registra en la literatura al respecto (Yoshimori, 2005). En cuanto a su tasa de producción por la radiación cósmica depende de la altitud con 67 % a 75 % sucediendo en la estratosfera, y alrededor del 25% a 33% en la troposfera (Usoskin y Kovaltsov, 2008). En cuanto al descenso del Be-7 esta es variable. Su concentración cerca de la superficie de la Tierra varía de un orden de magnitud entre las latitudes tropicales y las sub – polares (Usoskin *et al.*, 2008).

Por su vida media corta y los hábitos de adherirse a las partículas muy finas suspendidas en el aire, el Be-7 ha sido muy utilizado como trazador para el estudio atmosférico, tanto climático como meteorológico. En el esquema de desintegración de Be-7, se puede observar que la vida media es de 53,22 días y es un emisor gama en 477,62 keV. Otro trazador utilizado es el Na-24, pero tiene una vida media más corta, de 14,96 horas y emite una radiación gama de 1,37 MeV. El Be-10 es de vida media mucho más larga (más de un millón de años y es emisor beta).

Si los tiempos de vida media son cortos, estos elementos pueden ser utilizados como trazadores de la evolución de las masas de aire y para determinar el depósito de partículas finas sobre la superficie de la Tierra.

Igualmente, la concentración de los isótopos de vida media corta, en las capas de la troposfera, es sensible a los coeficientes de difusión vertical de Eddy. Es importante notar que en las bajas y muy altas latitudes hay poca concentración de Be-7 y su deposición sobre la superficie es menor.

Debido a que los procesos microscópicos responsables de la mezcla atmosférica son muy complejos (los fenómenos complejos son del ámbito de la física del caos determinista) para modelarlos en detalle, los constructores de modelos generalmente tratan la mezcla atmosférica como un proceso macroscópico de difusión de Eddy. En las primeras explicaciones científicas clásicas de la formación del flujo turbulento por Andréi Kolmogoróv y Lev D. Landau (teoría de Hopf-Landau) se encuentra que utilizan la hipótesis del continuo de Eddy pero sustituyen las pequeñas escalas de Eddy por partículas de fluido. Esto se hace incluso en la formulación moderna de la turbulencia de David Ruelle y Floris Takens. Varios autores, en los textos, la utilizan para calcular la distribución de la actividad específica de las partículas suspendidas con diferentes valores de los parámetros dependientes de la altura. Para aplicar la hipótesis del continuo de Eddy, hacen un análisis de escala para verificar que los periodos promedios son suficientemente largos para que las pequeñas escalas turbulentas de Eddy sean representativas del efecto dinámico en el flujo promedio. Otra manera de decirlo es que la mezcla de aire es causada por “eddys” que pueden variar en tamaño, y van de las pequeñas micro - escalas de torbellinos de Kolmogorov a los giros subtropicales macroscópicos. Como la predictibilidad es a corto plazo, la aproximación es suficiente para los efectos buscados (Brown, 1990). En el caso de Na-24 fue analizado y aplicado. Un factor importante, por ejemplo, es el coeficiente de difusión vertical de Eddy K . Este coeficiente está en el rango que va de 5×10^4 a $3 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, pero para alturas por debajo de 4,0 o 5,0 km, la sensibilidad de la concentración de Na-24 al valor del coeficiente de difusión Eddy, decrece. Lo que llevó a concluir que el Na-24 también se produce en la baja atmósfera (Roedel, 2012).

Las concentraciones de los radioisótopos en el aire dependen así de la producción y del tiempo de decaimiento. Por otro lado, también depende de los intercambios de masas de aire entre la troposfera y la estratosfera y de los depósitos secos y húmedos de los aerosoles (su remoción en la troposfera se puede dar por la actividad pluviométrica). Hay tres factores principales que influyen en los intercambios de las masas de aire: la fuerza de gravedad, los gradientes de presión y la inercia de Coriolis. La distribución vertical de las partículas está influida por el balance entre la gravedad y el gradiente de presión. En la dirección horizontal, Coriolis y el gradiente de presión juegan un papel importante generando los flujos geostróficos. A bajas altitudes este flujo es modificado por las fricciones entre las masas de aire y la topografía del terreno (montañas, edificios, etc.). Leppanen y otros (2008), encontraron una dependencia en la producción del Be-7 con la geografía, así como un sello proveniente del patrón climático local y aparece, aunque no muy claramente, una separación entre la producción y el transporte del berilio.

Como consecuencia del accidente de Chernobyl, se estudió la distribución granulométrica del Cs -137 y del I-131 y se encontró que el diámetro aerodinámico medio es de 0,4 μm similar al del Be-7, con módulos de velocidad de deposición seca sobre la superficie terrestre similares de $1 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ para el Berilio y el Cesio y de $3 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ para el I-131 (Roed, 1987). Los resultados de este estudio llevan a afirmar que ni la temperatura de la superficie terrestre, ni la turbulencia atmosférica tuvieron influencia observable sobre la deposición y su origen está más bien en la condensación del agua presente en el aire que aumenta el tamaño de los aerosoles y el módulo de la velocidad de deposición seca. Los isótopos de Be-7 formados se adhieren a los aerosoles de diámetros entre 0,3 - 0,6 μm (partículas denominadas finas) y cuyo tiempo de residencia en la atmósfera es, en promedio, 20 días (Devell et al., 1986).

Por ser el Be-7 un trazador natural en la atmósfera, permite conocer, a largo plazo, las variaciones en la deposición de aerosoles cuyo tamaño de grano y dinámica corresponde a los de 0,40 micrómetros. Esto permite inducir que los aerosoles que le son similares como por

ejemplo el Cs-137 y el I-131, tienen igual dinámica de deposición. Este resultado pasa a ser interesante en los problemas de protección radiológica de tipo ambiental.

PARTE EXPERIMENTAL

Filtros 3M debidamente estudiados (Tuomas y Mikael, 2000) se introducen diariamente en una aspiradora de partículas, marca Senya, con flujo nominal de 1 000 m³ por hora y debidamente calibrado. Con un flujo promedio medido en tiempo real de 980 m³/h, y después de alrededor de 24 horas, se colectan 23 000 metros cúbicos de partículas PM10. Se tiene una estación meteorológica Vaisala en el sitio donde está la aspiradora.

Los filtros tienen una eficiencia de casi 100 % para las partículas cuyo diámetro es igual o superior a 0,4 µm, y superior a 85% para las que están entre 0,15 y 0,40 µm (Tuomas y Mikael, 2000). Se verificó la retención de partículas finas por microscopía electrónica de barrido, las cuales interesan por los hábitos del Be-7 tal como se señaló en la introducción, y por Espectroscopia Mòssbauer de transmisión (superparamagnetismo) se probó que se colectan incluso partículas nanométricas (Fernández et al., 2011).

Una vez recogido el filtro, se lleva al laboratorio situado a unos 300 m de distancia del sitio de la aspiradora. Se prensa (prensa Karl Kolb de Scientific Technical Supplies) a 100 kN, en un molde que permite hacer pastillas de 50,0 mm de diámetro y 5,0 mm de espesor, con miras a garantizar la reproductibilidad de la geometría de la muestra. El filtro se pesa después del muestreo, todas las mañanas, a las seis horas locales (11:00 UTC), con una balanza Ohaus (modelo Pioneer) de precisión 0,001 g (con lo que recoge información sobre las PM10). A continuación, se empaquetan en porta muestra plástico hechos con un material estudiado para garantizar la reproductibilidad en los porta muestras que se usan diariamente y con niveles muy bajos de radiación de fondo (Alron Plastics Pil, Australia, 2018). La trazabilidad se garantiza con una etiqueta de código de barras.

El laboratorio está en condiciones de temperatura y humedad controladas por sensores que miden los parámetros en tiempo real. Incluso cada cierto tiempo se miden las partículas

suspendidas en el aire dentro del laboratorio. También se miden diariamente los niveles de radón. Los filtros prensados se dejan decaer por 24 horas con miras a evitar las interferencias de los nucleidos radiactivos relevantes para el tratado con los de vida media muy corta. Para la toma de espectros, se utiliza un detector Canberra de Germanio hiperpuro GC5020, con cristal cilíndrico de 65,0 mm de diámetro, 67,0 mm de largo y 5,0 mm de distancia de la ventana, con una eficiencia de fábrica del 56,1 % (relativa al NaI) y una resolución referente al pico estándar de 1 332 keV (Co-60) de 1,93 eV (en el laboratorio se tiene de 1,9 eV en promedio mensual, y 1,0 eV al pico 122 keV del Co-57) medida para control de calidad diario (QC) con una fuente patrón NPL (de trazabilidad 81020X). El multicanal es de 8 192 canales (Canberra DSA - 1000) con una energía hasta de 2 800 keV. La curva de calibración en energía y eficiencia se muestra en las figuras 2 y 3 respectivamente.

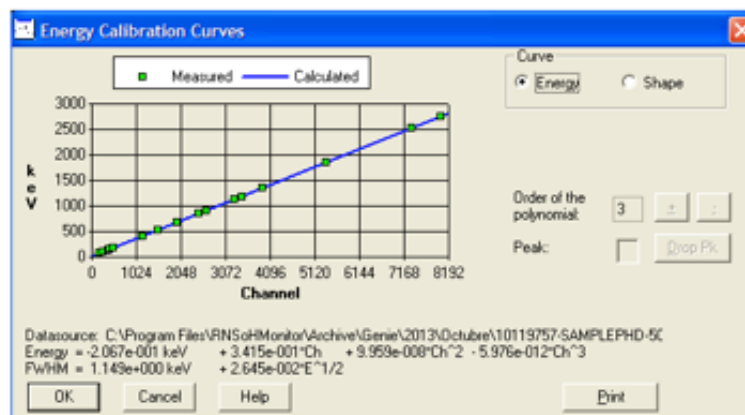


Fig. 2. Imagen de la calibración, en energía, del detector.

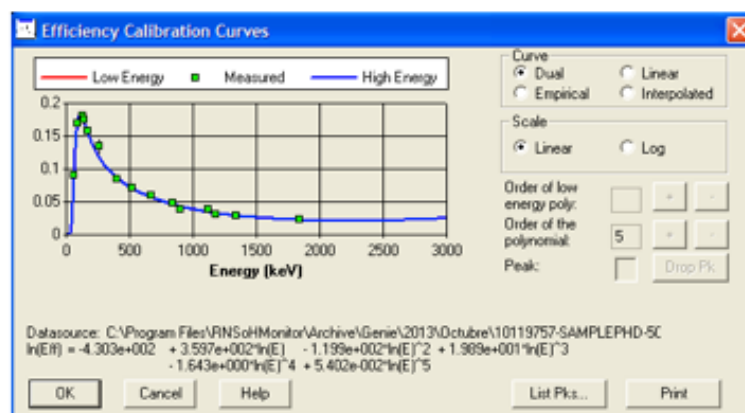


Fig. 3. Imagen de la calibración, en eficiencia, del detector.

El sistema es enfriado con un criostato eléctrico modelo Cryo-Pulse 5 de Canberra. Para evitar interrupciones debido a apagones o variaciones en el sistema eléctrico se tiene un UPS (true-on-line) acoplado a una planta eléctrica auxiliar. Para el control del espectrómetro y sus accesorios, y para el análisis de los espectros se utiliza el programa Genie 2000 con una biblioteca y una subrutina de ajuste especiales del CTBTO. Se usan filtros electrónicos para evitar el desmejoramiento de la resolución debida a los efectos piezoeléctricos (vibraciones). El manejo de las muestras se hace respetando el protocolo que evite la contaminación cruzada.

La geometría detector-porta muestra se garantiza con un soporte-molde de teflón (al cual se le ha estudiado el fondo radiactivo) para que la muestra ocupe siempre la misma posición sobre el detector. El sistema está blindado con un “shield” Canberra modelo 747. Con ese sistema logramos excelentes MDC promedios.

Para tener un control externo sobre la calidad de las mediciones, se envían de manera regular, por lo menos cada seis meses, muestras a uno de los 16 laboratorios externos de la red (IMS) que permitan inter-comparar para realizar las correcciones de calibración. La inter-comparación con estos laboratorios especializados y certificados permite a las estaciones hacer los correctivos necesarios para mantener la calidad de las mediciones. Estos laboratorios tienen las instalaciones en condiciones de laboratorios primarios.

A mediados de los años 70 (May, 1976), se estableció científicamente que varias áreas de la naturaleza, entre ellas la meteorología, se caracterizan porque sus variables clásicas tienen un comportamiento de caos determinista, por lo tanto, los sistemas de ecuaciones no son integrables ni siguen teorías de probabilidades, y en la búsqueda de una solución por iteración mediante cálculo numérico se demostró una fuerte sensibilidad a las condiciones iniciales. Por ello las correlaciones son a corto plazo e incluso cuan corto es el plazo no entra dentro de la predicción probabilista. Se buscan patrones generales de comportamiento (por ejemplo, históricos o de comportamiento similar con otro fenómeno) en los parámetros del sistema.

En ese sentido el CTBTO calcula diariamente, por computadora, usando los dos métodos numéricos conocidos de back tracking con la información mundial de la red

meteorológica el origen de la nube que trajo de regiones fuera del radio local indicado por el FOR “Field of regard” y así establecer si los trazadores atmosféricos son indicadores de relaciones locales o a más largo alcance entre la nube y la detección de radionucleidos. Los modelos de dispersión son el de PARTículas y FLExible (FLEXPART) que son de tipo Lagrangiano y simulan las trayectorias de las parcelas de aire. Recordemos que por la forma en que plantean las ecuaciones que describen la propagación de las partículas en la atmósfera, se les puede clasificar como modelos eulerianos que son aquellos que usan un sistema de coordenadas fijo con respecto a la Tierra y modelos lagrangianos que usan un sistema de coordenadas que se ajusta al movimiento de la atmósfera misma.

Se puede ejecutar en modo hacia delante o hacia atrás. El modo de hacia adelante se utiliza normalmente para determinar la concentración que se propaga a favor del viento o la relación de mezcla de los contaminantes. El modo hacia atrás se puede utilizar para estimar las áreas de la huella dejada, y permite determinar el origen de la emisión detectada. El otro modelo es el HYSPLIT y es también del tipo Lagrangiano, pero es híbrido integrado y permite calcular las trayectorias de las parcelas de aire y la dispersión o deposición de contaminantes atmosféricos. Fue desarrollado por la NOAA y la Oficina de Meteorología de Australia. Permite determinar, combinado con imágenes de satélite (por ejemplo, de los satélites MODIS de la NASA), si los niveles de un radionucleido en un lugar son causados por el transporte del aire desde otro lugar, (retro-trayectorias de HYSPLIT).

Usaremos los indicadores históricos y los suministrados por el análisis del CTBTO para indicar correlaciones cualitativas entre parámetros (Fernández y Pérez, 2015).

Localización y caracterización meteorológica del sitio

La estación PAP50 está situada en la ciudad de Panamá, en la Universidad de Panamá. Las coordenadas referenciadas son: latitud $8^{\circ} 59' 00.9''$ N ($8,984^{\circ}$ N), longitud $79^{\circ} 31' 59.1''$ W (79.533° W) y a una altura de 90 m (a la entrada de la aspiradora).

En la figura 4 se muestra la comparación de valores normalizados de la precipitación, humedad relativa, detección de Be-7 y la temperatura. En cuanto al régimen de lluvias de la ciudad de Panamá (promedio de 14 años), la gráfica indica la existencia de dos estaciones. La estación seca que se extiende de *enero* a *abril*. La estación lluviosa que se extiende de mediados de *abril* a mediados de *diciembre* con picos relativos en mayo, agosto y octubre, y un veranillo llamado de San Juan entre los picos. Se aprecia, contrario a la precipitación, un aumento de la detección de Be-7 en la estación seca y una disminución de dicha detección en la estación lluviosa. Este fenómeno podría estar ligado a que en la estación lluviosa las partículas suspendidas en el aire son lavadas de la atmosfera por la lluvia.

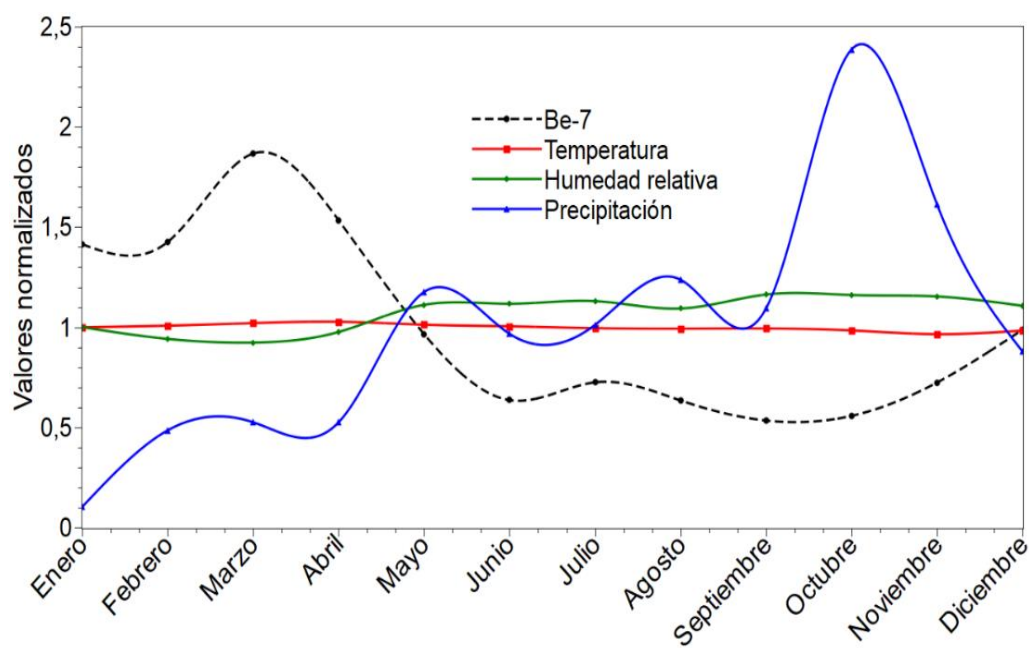


Fig. 4. Valores normalizados, por mes, de Be-7, Temperatura, Humedad, Precipitación del 2006 al 2019 (14 años de datos).

En la figura 5 se representa gráficamente la irradiación (insolación) medida en la estación PAP50 (valores tomados día a día) para los años 2007 y 2017. En ambas representaciones se aprecian dos grandes regiones de acumulación de puntos (partes más oscuras) que corresponden a los momentos sin nubosidad (estación seca) y a los de nubosidad (estación lluviosa).

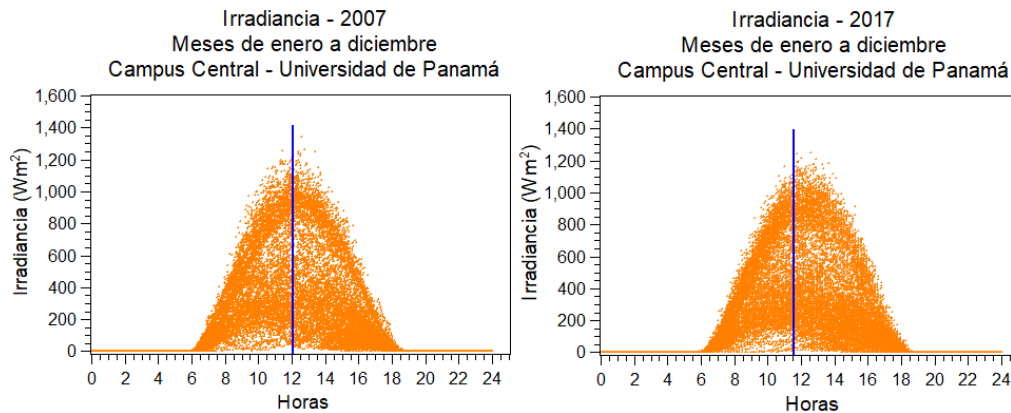


Fig. 5. Radiación diaria en la estación PAP50, durante los años 2007 y 2017.

Características de la radiación de fondo

En el sitio (Estación RN50) donde se hacen las mediciones con el detector de Germanio hiperpuro se mide diariamente el radón y la medición se verificó en mayo de 2012, por Intercomparación con Radón Control Laboratory, Dosirad Company, Francia.

Con los datos de los programas “Surface USA Air Sampling Program: radioactivity measurements, Global Fallout Deposition Program, High Altitud Sampling Program (Ashcan-balloon, stardust-aircraft and airstream-aircraft)” se obtuvieron los datos en Panamá para determinar la presencia, en altitud, de Be-7 y Pb-210. Estos datos fueron suministrados por el ejército de los Estados Unidos (Fernández *et al.*, 1999).

En la latitud y longitud de Panamá, a alturas que van de 12,6 km a 19,8 km (alturas donde se da la inversión de temperatura) se midió, por avión, el Be-7. A esta altura que indica la diferencia entre troposfera y estratosfera, se encontró que se tiene una producción promedio de 150 mBq/m³, que, comparado con los valores medidos inicialmente, en la superficie, que van de hasta de 5,0 mBq/m³, es bastante alto.

Los aerosoles o partículas totales suspendidas en el aire PM10, en ciudad de Panamá, son de origen natural y antropogénico. La mayoría de los aerosoles naturales provienen de la erosión de las rocas (básicamente de los desiertos como el del Sahara que llega al Caribe y a América Central) y del agua marina. Ciudad de Panamá está entre dos mares. Estas partículas naturales tienen básicamente la misma composición que la fuente de origen. Sin embargo, cerca del 30% de los aerosoles naturales provienen de las actividades humanas. El sistema industrial,

la construcción y el flujo vehicular generan la mayor parte de los aerosoles antropogénicos. Las partículas en el aire afectan la irradiación solar en tierra luego el clima y la meteorología.

En el sitio web de la Estación RN50 se ha colocado un “registro histórico de la Calidad del aire, PM10, desde el 2006, Universidad de Panamá, Campus Central, Octavio Méndez Pereira”. («Estación RN50», 2018). Un resumen del registro histórico se presenta en la figura 6 (promedio de 14 años), las razones de lo que se observa en dicha figura pueden ser los vientos que elevan las partículas del suelo pues hay vientos más fuertes y abundantes y menos lavado de las partículas por la lluvia en la estación seca. Las partículas de origen marino tienen potasio, así como las que tienen como origen la erosión de las rocas sobre todo los granitoides. El análisis de las partículas muestra contenidos relativos importantes de sodio y potasio. Las partículas que tienen por origen la erosión de las rocas tienen Pb-210.

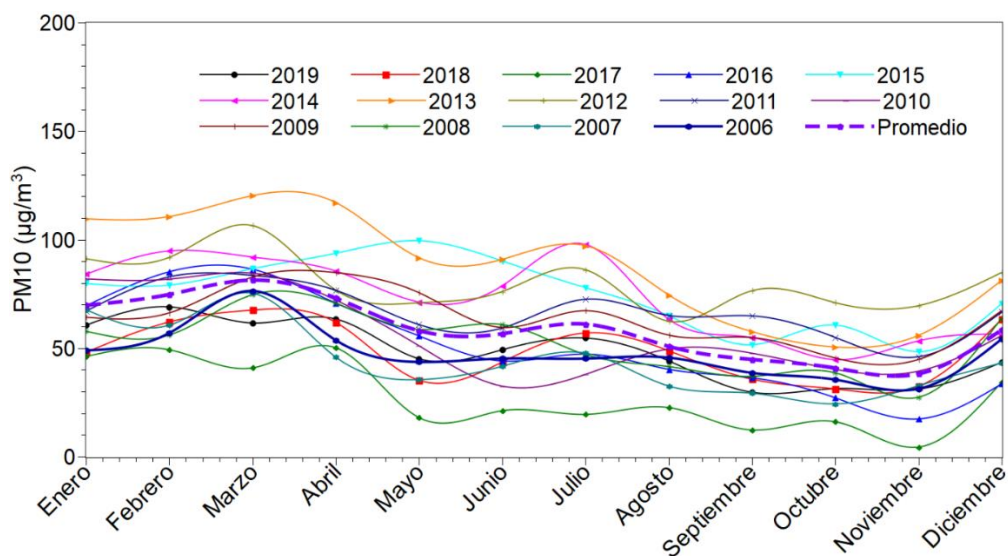


Fig. 6. Partículas PM10 en el Campus Central de la Universidad de Panamá de 2006 a 2019.

A más partículas, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, deberíamos tener mayor contenido de $\text{Be-7}/\text{m}^3$. Existe una fluctuación en el promedio anual del contenido de partículas suspendidas. Sin embargo, aparece un aumento sistemático, fuera de la fluctuación, que se inicia en el 2010 (con el aumento sustancial de la actividad de construcción) y continúa subiendo apreciablemente lo cual se confirma en lo que va del año 2013. Este aumento de la contaminación PM10 se ve reforzado por la construcción del metro urbano y las mejoras en el sistema vial de la ciudad de Panamá que genera tranques vehiculares, luego aumento de las partículas emitidas por los autos. Este

aumento de la contaminación (por partículas suspendidas en el aire) proviene básicamente de la contaminación por la circulación de los autos como se observa en la curva por día de la semana, durante la estación seca y no del aumento por otras fuentes. El Be-7 tiene vida corta, por lo que normalmente no debe aumentar su contenido por m^3 en las partículas suspendidas en el aire recolectadas dado el aumento de la circulación vehicular.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Trazador Be-7

Se estudió el Be-7 diariamente desde abril del año 2006 hasta abril del año 2019. La figura 7 es la representación gráfica, semana promedio a semana promedio, de los resultados de la medición del Be-7 con el detector de Ge hiperpuro. En la curva diaria (figura 8) se observa un fenómeno de fluctuación muy intensa de caos (curva parecida a la del movimiento browniano). En la gráfica semanal se nota un “*batido*” (modulación de amplitud promedio por una onda envolvente de frecuencia muchos más pequeña) que indica que hay dos frecuencias muy próximas que se suman al fenómeno y que no se observa en los gráficos encontrados en la literatura para la medición del berilio en otras latitudes. Esto posiblemente se deba al doble pico que muestra la emisión solar en su ciclo de once años.

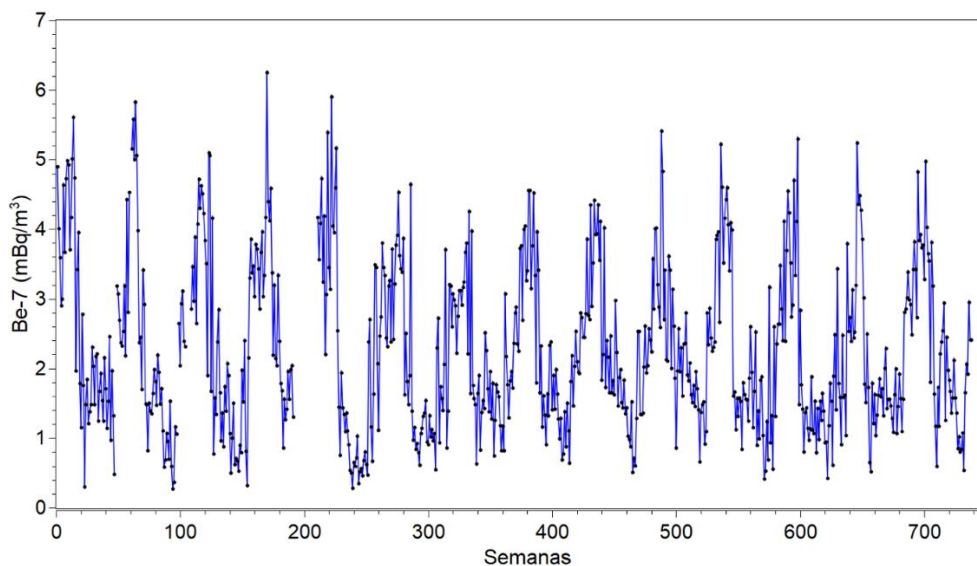


Fig. 7. Variación promedio semanal (de catorce años), del Be-7, en PAP50. Campus Central Universidad de Panamá (01 de abril de 2006 al 31 de diciembre de 2019).

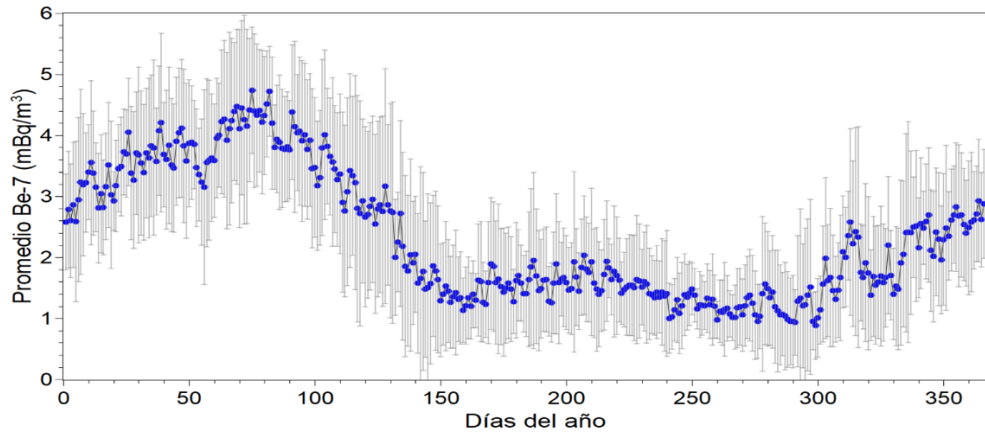


Fig. 8. Promedio diario de Be-7 del 01 de abril de 2006 al 31 de diciembre de 2019.

Ese crecimiento lineal significa que la lluvia, aumentando, lava las partículas que contienen el berilio las cuales por su tamaño, composición o hábitos son sensibles al lavado acumulativo de la lluvia. En la estación seca va aumentando linealmente con la inexistencia de la lluvia.

En la gráfica de la figura 9 de los promedios mensuales, se observa la variación con el mes calendario, indicador de la dependencia con el fenómeno asociado a la convergencia intertropical. Hay dos mínimos relativos con el veranillo de San Juan entre ellos y dos máximos relativos, uno muy pronunciado en estación seca y otro en el veranillo de San Juan. Se puede decir entonces, que el berilio es un buen indicador de fenómenos que influyen el clima y la meteorología.

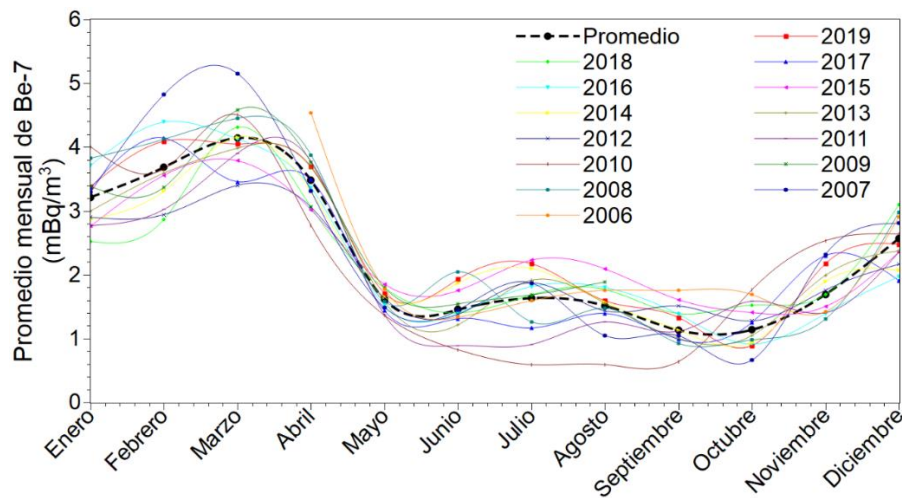


Fig. 9. Variación mensual promedio del Be-7 desde 2005 al 2019.

B. TRAZADOR K-40

El potasio cuarenta (K-40) es un radioisótopo primordial que tiene una vida media de $1,277 \times 10^9$ años y una energía gamma en 1 460,75 keV. Se desintegra por dos vías, en Ar-40 y en Ba-40. Se encuentra en las rocas y sedimentos, así como en los compuestos iónicos marinos. Su presencia en las partículas suspendidas en el aire debe provenir del mar o del polvo del suelo, que lo hace llegar a la aspiradora debido a los vientos. El análisis del contenido de potasio en las partículas suspendidas en el aire, por espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP – OES) captadas en PAP50 indica que es un poco alto al compararlo con otras ciudades como Coimbra, Azusa, Edison y Anaheim (Fernández et al., 2011). Se explica por la cercanía marítima de la ciudad de Panamá (al borde del océano Pacífico y a 80 km del océano Atlántico).

En la figura 10 se observa que en los primeros 90 días del año, el promedio de detección aumenta linealmente, mientras que después de bajar, se mantiene constante hasta final de septiembre y después disminuye ligeramente para mantenerse constante hasta que se reinicia de nuevo lo que ocurre en periodo seco. Se debe señalar que el crecimiento o disminución es menos pronunciado que para el Be-7. Los datos de medición desde el 2006 al 2019 señalan una disminución de K-40 (figura 11), aproximadamente en el 2015 (a los 3 660 días). En el último año (2019) se vuelve a detectar con más frecuencia K-40.

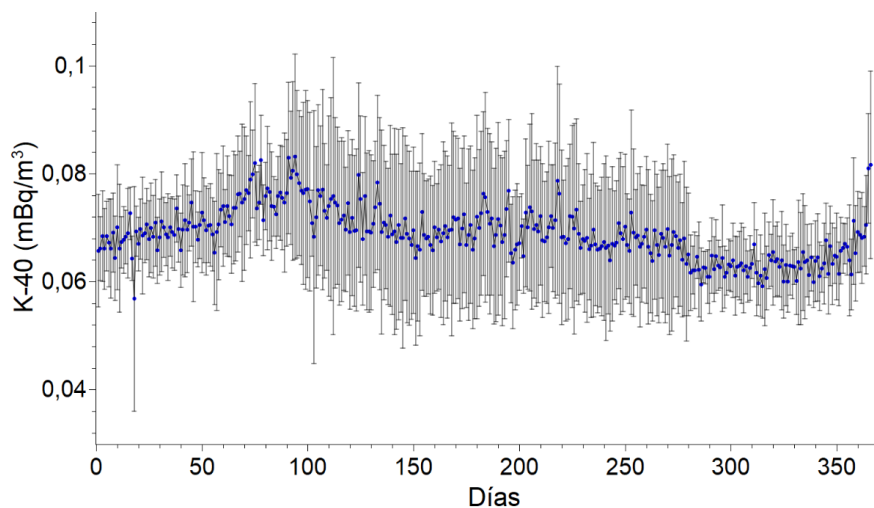


Fig. 10. Promedio diario del K-40 del 2006 al 2019.

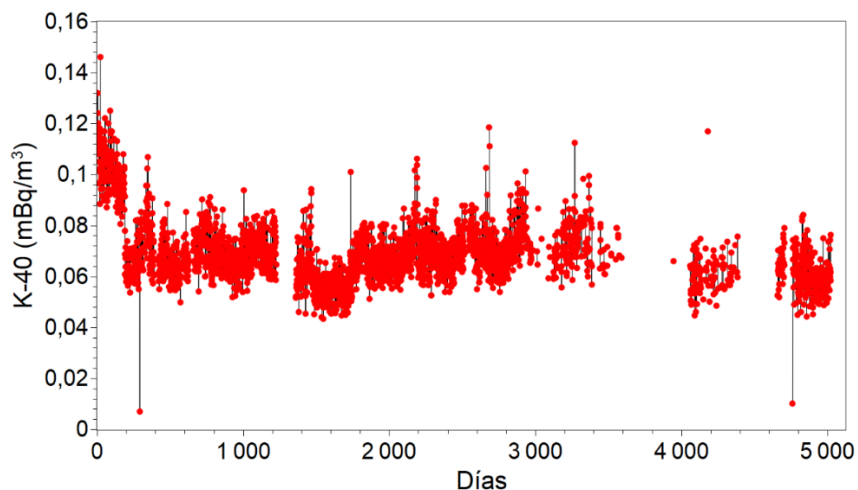


Fig. 11. Medición diaria del K-40 de 2006 a 2019.

La detección del K-40 es sensible a los fenómenos locales como vientos y lluvia. Viento porque levanta el polvo y lo deja en el aire en estación seca y va aumentando a medida que pasan los días. Las lluvias, al llegar mantienen constante el K-40 en el aire y al aumentar radicalmente las mismas, en octubre, baja su proporción en el aire un poco más (lava las partículas más grandes) y después se mantiene constante. El K-40 no es sensible a la influencia de otros factores climáticos, ni a la contaminación ambiental por aumento de la circulación vehicular o la construcción.

C. TRAZADOR Pb-210

El plomo-210 es un radioisótopo natural que está en la cadena del uranio-238 ($4n+2$), llamada también del radio, que es una cadena fósil o primordial. Es un emisor alfa, beta y gamma con vida media de 22,3 años, pero con el detector gamma se ve en el pico 46,52 keV. En la atmósfera, el Pb-210 se asocia a aerosoles entre 0,05 y 2,00 micrómetros, luego partículas finas. De acuerdo con estudios hechos por diferentes autores los flujos de Pb-210 dependen de la región considerada y está relacionado con la pluviometría local (Sánchez-Cabeza et al., 2012). Aparece en los aerosoles por el viento y por su ciclo a través del radón. En la figura 12 se muestra una representación gráfica de las mediciones diarias del Pb-210 desde el 2006 al 31 diciembre de 2019).

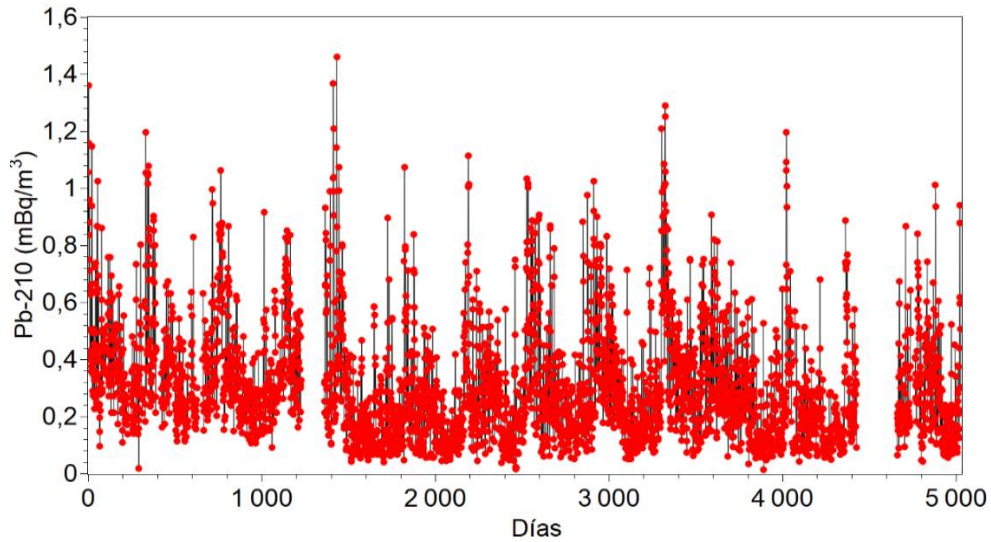


Fig. 12. Medición diaria del Pb-210 de 2006 a 2019.

La cantidad de Pb-210 aumenta regularmente (linealmente) en época seca y baja regularmente (linealmente) en época lluviosa (figura 13).

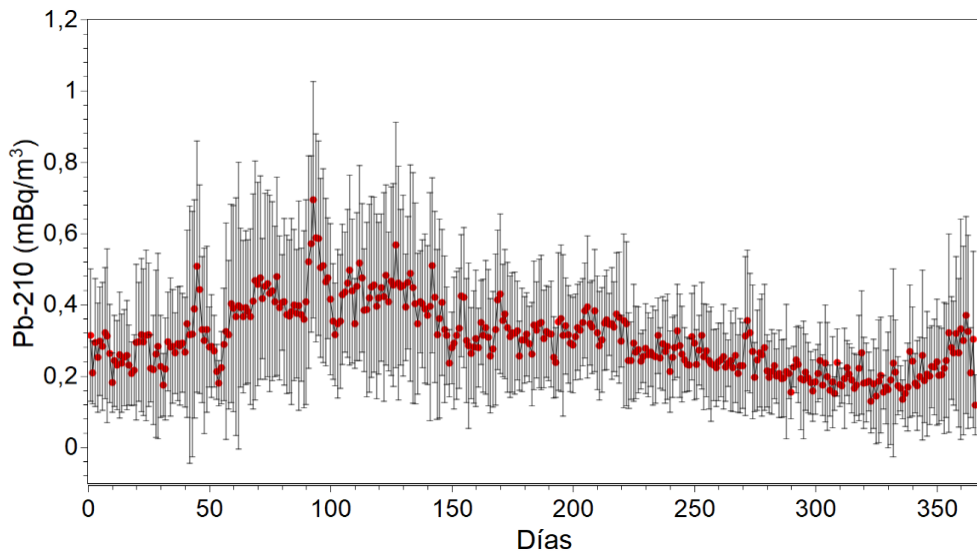


Fig. 13. Contenido promedio diario de Pb-210, en función del día del año (2006 al 2019).

En ninguno de los dos casos, ni del K-40, ni del Pb-210 se ve el fenómeno relativo a la actividad solar, pues la formación del K-40 y del Pb-210 no está en los rayos cósmicos que provienen del Sol. Son elementos primordiales o fósiles. La variación del Be-7 más significativa de la actividad solar fue el valor promedio (de ocho años), semanal, del Be-7 en PAP50.

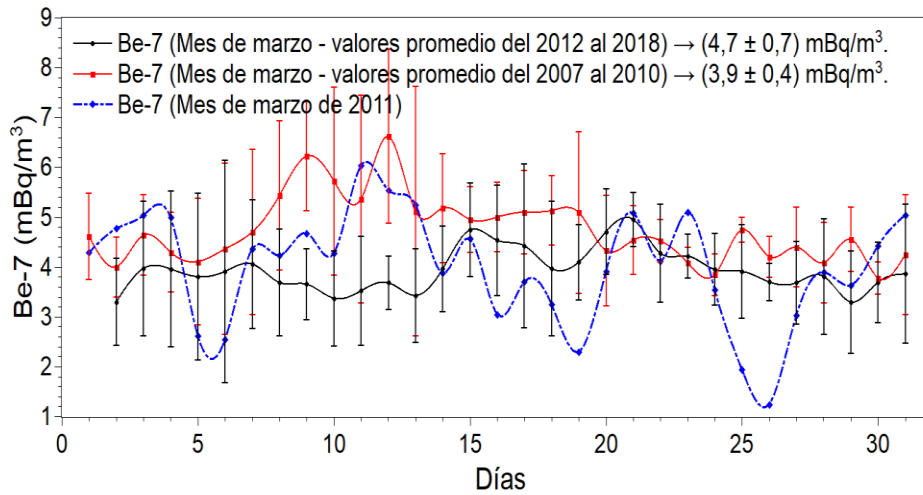


Fig. 15. Comparación de la detección del Be-7 de marzo de 2011, con la detección promedio antes y después de Fukushima.

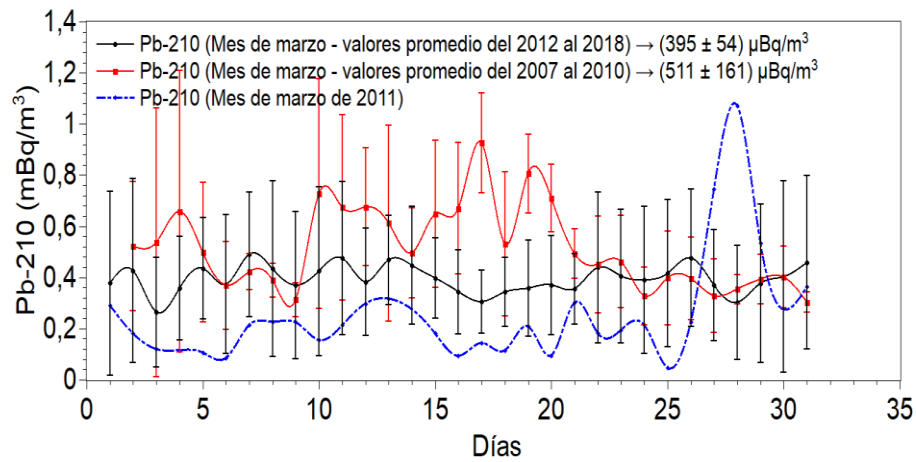


Fig. 16. Valores del Pb-210 durante el evento de Fukushima.

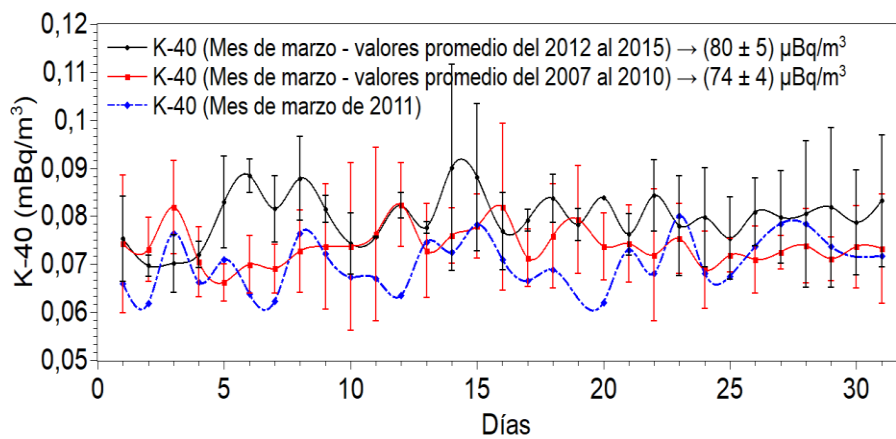


Fig. 17. Valores del K-40 durante el evento de Fukushima.

CONCLUSIÓN

Se han visto tres trazadores radiactivos naturales de los fenómenos atmosféricos (climáticos y meteorológicos), el Be-7, el K-40 y el Pb-210. Ya Matthews había estudiado el Na-24 en el caso de PAP50 (y otras estaciones del IMS) y señaló que es una estación eficiente en rango de latitudes 0-10° para la detección de fenómenos radiactivos que se propagan en la atmósfera por debajo de la barrera que se encuentra alrededor de 5,0 km (2011).

Además del Na-24, cada uno de los radioisótopos estudiado aquí (Be-7, K-40 y Pb-210) da información referente al comportamiento de la estación PAP50. El Be-7 da información sobre el comportamiento de los rayos cósmicos (solares y galácticos) que influyen en el comportamiento atmosférico local. Es dependiente del fenómeno de convergencia intertropical que modula fuertemente el clima y la meteorología local. También depende de la insolación. Da información sobre los movimientos verticales luego del acoplamiento entre la estación y la propagación en capas superiores. El K-40 informa de vientos marinos y terrestres, luego es dependiente de fenómenos locales. El Pb-210 depende más de los vientos terrestres, pero muy poco de la contaminación ambiental por partículas.

En ese sentido, durante el evento de Fukushima, que tuvo lugar en el mes de marzo de 2011, correspondiente a la estación seca en Panamá, las mediciones arrojaron los siguientes valores para esos parámetros (figura 14, 15 y 16).

El Be-7 no tuvo diferencias marcadas durante el evento de Fukushima, con respecto a las mediciones realizadas antes y después de dicho evento (figura 14). En cuanto al Pb-210 estuvo por debajo del promedio (figura 15) y como este radioelemento es indicador de la propagación cerca de la superficie, podemos decir que había pocos vientos. Esto coincide con la pluviometría que mostraba lluvias fuertes muy cortas lo cual se vio en el lavado del I-131. Este fenómeno es muy similar al del K-40 (figura 16) que también estaba por debajo del promedio histórico

La detección de I-131, Cs-137, Cs-134 se dio por primera vez el 23 de marzo de 2011, la de Xe se dio el 10 de abril. La propagación de la nube no siguió los vientos de alturas de 11 km pues serían de sentido inverso, pero si los de 350° que detectan las estaciones terrenas y no son de origen local como indican los bajos valores de K-40 y Pb-210.

Se puede concluir, aunque de manera muy corta, que las estaciones PAP50 y PAX50 han demostrado ser estaciones eficientes en la detección de radionucleidos en latitudes bajas entre 0-10°. Esto permite, junto a la red IMS del CTBT, vigilar los ensayos nucleares, pero a la vez apoya el sistema de vigilancia ambiental de la región (América Central y el Caribe) y de Panamá. El seguimiento estrecho del comportamiento climático y meteorológico, así como sus trazadores radiactivos, permitirán conocer los cambios climáticos que se estén dando, así como serviría de apoyo, en caso de emergencia, para suministrar criterios en la toma de decisiones sobre los parámetros confiables que se deben usar en la simulación de la propagación de una nube de origen local, regional o mundial y poder apoyar los sistemas civiles de alerta temprana para evitar afectar las poblaciones. Así se cumpliría con los principios básicos de la protección radiológica, “justificación, limitación de la dosis, optimización de la protección”.

BE-7, K-40, AND PB-210 ATMOSPHERIC TRACERS IN PANAMA CITY

SUMMARY

The radionuclide Stations of the International Monitoring System of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) were originally designated for detecting nuclear tests. However, the network has a scientific and environmental interest for civil applications beyond the original aim. So, in this paper, the Be-7, Pb-210 and K-40 detection as climatic and meteorological parameters, in Panama City, give us valuable information for modeling the transport of air pollutants. These parameters can be correlated with the spread of a radioactive cloud, near the RN50 station site. It is suggested that the Be-7 is a more global indicator parameters and both, Pb-210 and K-40 are more local indicators of the RN50 effectiveness of radionuclide monitoring.

KEYWORDS: CTBTO, radionuclides, radioactivity, cosmogenic, nuclear tests.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENNETT, B. G. (1990). Worldwide radiation exposure from the Chernobyl accident. *International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA*.

BROWN, R. A. (1990). *Fluid Mechanics of the Atmosphere*. Academic Press, pp. 490.

DEVELL, L., TOVEDAL, H. BERGSTRÖM, U., APPELGREN, A., CHYSSLER, J., y ANDERSSON, L. (1986). Initial observations of fallout from the reactor accident at Chernobyl. *Nature* **321**: 192-193.

FERNÁNDEZ, B., PÉREZ, O., JAEN, J. y MÓJICA, B. (2011). The RN50 station of the International Monitoring System (IMS) as a reference station to the airborne particles pollution in Panama City (Published Conference Proceedings style) in Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. Science and Technology Conference, (S&T2011), T1-P08, Vienna, Austria, pp. 35. <http://www.ctbto.org/?id=3355>

FERNÁNDEZ, B., PÉREZ, O. y ACOSTA, M. (1999). Informe de factibilidad de la Instalación de la Estación PAP50. On site survey radionuclide station RN50 at Panama City. Panamá, Universidad de Panamá.

FERNÁNDEZ, B. y PÉREZ, O. (2015). Sección monografías. Monográfico 3: ATM Modelización del transporte atmosférico en la Estación RN50. Universidad de Panamá. <http://www.estacionrn50.org/monografias/>

GARCÍA-OLIVA, F., MARTÍNEZ R., y MAASS, J. M. (1995). Soil ^{137}Cs activity in a tropical deciduous ecosystem under pasture conversion in Mexico, *J. Environ. Radioactivity*, **26**: 37-49.

HAUPT, K. y MÜTZELBURG, T. (2011). Global radiation monitoring in the wake of the Fukushima disaster. *CTBTO Spectrum*, **16**: 18-19.

LEPPÄNEN, A. P., USOSKIN, I. G., ALDAHAN, A., ECHER, E., EVANGELISTA, H., KLEMOLA, S., KOVALTISOV, G.A., MURSULA, K., POSSNERT, G. 2010. Cosmogenic ^7Be in air a complex mixture of production and transport. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **72**, pp. 1036-1043.

LOVE, L. (2008). Magnetic monitoring of Earth and space. *Physics Today* Online, **61**(2): 31-37.

MAY, R. (1976). Simple Mathematical Models with Complicated Dynamics, *Nature*, **261**: 459- 467.

MATTHEWS, M. (2011). The effectiveness of radionuclide monitoring: assessed with a natural airborne tracer. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty: Science and Technology Conference, 8-10 June. Hofburg Palace, Vienna, Austria. Abstract T3-04, pp 68. (Published Conference Proceedings style).

ROEDEL, W. (2012). Cosmic-ray-produced sodium 24 and other nuclides in the lower atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, Published online.

ROED, J., (1987). Dry deposition on smooth and rough urban surfaces. The post- Chernobyl workshop, Brussels, 3-5, NKA/AKTU-245 (87)1.

ROZANSKI, K., GONFIANTINI, R., y ARAGUAS-ARAGUAS, L. (1991). Tritium in the global atmosphere: Distribution Patterns and recent trends. *J. Phys.G: Nucl. Part. Phys.* 17, S523.

ZANIS, P., SCHUEPBACH, E., GÄGGELER, H. W., Hübener, S. y TOBLER L. (2002). Factors controlling beryllium-7 at Jungfrauoch in Switzerland. *Tellus, Series B, Chemical and Physical Meteorology*, 51(4): 789-805.

USOSKIN, I. G., KOVALTSOV, G.A., (2008). Production of cosmogenic 7 Be isotope in the atmosphere: full 3-D modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113, D12107.

SÁNCHEZ-CABEZA, J.A., DIAZ-ASENSIO, M. y RUIZ-FERNÁNDEZ, A.C. (2012). Radiocronología de Sedimentos Costeros Utilizando ^{210}Pb : Modelos, Validación y Aplicaciones. *PNUMA. IAEA*. Publicación de: Laboratorio de Radiometría. Laboratorios del Medio Ambiente Marino. Organismo Internacional de Energía Atómica. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1538_S_web.pdf

TUOMAS, V. y MIKAEL, M. (2000). Testing of different types of flat filtering media for IMS radionuclide stations. Contract 02/1/20/025 Testing Services, STUK-Radiation and Nuclear Safety Authority, Research and Environmental Surveillance, Airborne Radioactivity, Finland.

USOSKIN, I. G., MURSULA, K., SOLANKI, S.K., SCHUESSLER, M. y G.A. KOVALTSOV. (2008). Cosmic Ray Intensity Reconstruction. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data. Contribution Series # 2008-013. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

YOSHIMORI, M. (2005). Beryllium 7 radionuclide as a tracer of vertical air mass transport in the troposphere. *Advances in Space Research* 36(5):828-832.

ALRO PLASTICS. (2018). Recuperado 25 de septiembre de 2019, disponible en <https://www.alro.com/Plastics/>

ESTACIÓN RN50. (2018). Recuperado 25 de septiembre de 2019, de <http://www.estacionrn50.org/>