

CICLOTRONES Y RADIACIÓN AMBIENTAL: EVALUACIÓN DEL IMPACTO RADIOLÓGICO EN EL PERÚ



NANCY MARIELA CHALLAPA VELÁSQUEZ, JOSÉ MANUEL OSORES REBAZA,
JAVIER FELICIANO CHALLAPA VELÁSQUEZ, RAUL MIGUEL JARA MARTÍNEZ

Ciclotrones y Radiación

Evaluación del Impacto Radiológico Ambiental en el Perú

Editor



Nancy Mariela Challapa Velásquez

 <https://orcid.org/0000-0002-7878-8534>

nchallapa@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

Jose Manuel Osores Rebaza

 <https://orcid.org/0000-0002-3966-8839>

josores@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

Javier Feliciano Challapa Velásquez

 <https://orcid.org/0009-0005-6774-5722>

jchallapa@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

Raul Miguel Jara Martinez

rjara@ipen.gob.pe

Instituto Peruano de Energía Nuclear, San Borja, Lima, Perú

ÍNDICE

RESEÑA	4
INTRODUCCIÓN	6
MARCO LEGAL Y NORMATIVO	8
CAPÍTULO 1	11
Descripción del proceso productivo	23
Descripción del entorno	24
CAPÍTULO 2	27
Producción mensual de ^{18}F	29
Caracterización radiológica de las descargas atmosféricas	31
Caracterización radiológica de las descargas líquidas.....	36
CAPÍTULO 3	38
Variables meteorológicas	40
Determinación al área crítica de impacto radiológico	44
Equivalente de dosis ambiental $\text{H}^*(10)$	46
Descargas atmosféricas de ^{18}F	49
Monitorización ambiental	51
CAPÍTULO 4	55
Evaluación de impacto en los trabajadores ocupacionalmente expuestos	56
Evaluación de impacto en miembros del público	57
Evaluación de impacto en componentes ambientales.....	58
Modelo de dispersión de descargas radiactivas en el área crítica	59
Estimación de los límites de descarga	66
Evaluación del impacto radiológico ambiental.....	69
CONCLUSIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	77

RESEÑA

Este libro constituye una obra pionera en el análisis y la reflexión crítica sobre la **Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)** aplicada a proyectos altamente especializados, como lo son las instalaciones de ciclotrones en el Perú. Con una narrativa clara y sustentada en fundamentos científicos, técnicos y normativos, la obra invita al lector a comprender cómo este proceso se ha convertido en una herramienta esencial no solo para prever riesgos, sino también para garantizar que las decisiones de inversión y desarrollo sean ambiental y socialmente sostenibles.

Lejos de limitarse a un enfoque teórico, el texto aborda casos reales y escenarios de gran relevancia, entre los que destaca la producción de **Fluor-18 (18F)** en instalaciones radiactivas. Estos complejos tecnológicos, que incluyen áreas críticas como la **sala caliente**, las **celdas blindadas**, los sistemas de **control de calidad** y el recinto del **ciclotrón autoblandado Siemens Eclipse HP de 11 MeV**, son examinados con un nivel de detalle que permite al lector visualizar cómo cada componente se articula con las exigencias ambientales, sanitarias y sociales.

La reseña se sumerge en la descripción del **laboratorio de producción de 18F-FDG**, resaltando la infraestructura y medidas de seguridad implementadas: desde el sistema de desagüe diferenciado hasta los mecanismos de extracción con **filtros HEPA y carbón activado**, diseñados para reducir la liberación de contaminantes. Estos elementos técnicos no son presentados de manera aislada, sino en su justa relación con los impactos que pueden generar sobre el entorno y la salud pública, lo cual evidencia la importancia de contar con una **visión integral de la gestión ambiental**.

La obra enfatiza que el cumplimiento de las disposiciones de la **Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN)** no constituye un trámite burocrático, sino una exigencia que garantiza la protección efectiva del medio ambiente y de las poblaciones que habitan en el área de influencia de estos proyectos. A través del análisis del **estudio de impacto**

radiológico ambiental, el libro muestra cómo se evalúan las descargas, emisiones, monitorización de componentes ambientales, así como la estimación del **equivalente de dosis ambiental $H(10)^{**}$* . El lector encuentra, entonces, no solo un marco técnico riguroso, sino también una narrativa que humaniza el tema al mostrar su relevancia directa sobre **los trabajadores, el público y el entorno natural**.

Más allá de los datos técnicos, el libro busca despertar conciencia sobre la necesidad de conjugar ciencia, responsabilidad social y gobernanza ambiental. El mensaje central es que la **Evaluación de Impacto Ambiental** no es un simple requisito legal, sino un instrumento que contribuye a redefinir la relación entre desarrollo tecnológico y sostenibilidad. En un país como el Perú, donde los ciclotrones cumplen un rol clave en el ámbito médico, esta reflexión adquiere una vigencia indiscutible.

En síntesis, estamos ante una obra que logra un delicado equilibrio entre el rigor científico, la descripción técnica y la reflexión ética. Su lectura es imprescindible no solo para especialistas en gestión ambiental y radioprotección, sino también para estudiantes, académicos, profesionales de la salud y tomadores de decisiones que buscan comprender cómo la ciencia y la regulación se entrelazan para garantizar un futuro más seguro y sostenible. Este libro no se limita a describir, sino que invita a pensar, cuestionar y actuar con responsabilidad frente a los desafíos ambientales del presente y del mañana.

INTRODUCCIÓN

Antes de adentrarnos en la descripción detallada de los emplazamientos objeto de análisis, resulta indispensable establecer un marco general de referencia que otorgue coherencia y fundamento a la investigación. Este espacio intermedio, concebido como un puente entre la introducción y el primer capítulo, busca no solo preparar al lector en la comprensión de los aspectos técnicos que se abordarán, sino también subrayar la relevancia multidimensional que conlleva la evaluación del impacto radiológico ambiental generado por el uso de ciclotrones en el Perú.

En este sentido, cabe recordar que los ciclotrones, al ser dispositivos de aceleración de partículas empleados tanto en investigación como en aplicaciones médicas — particularmente en la producción de radioisótopos para diagnóstico por imágenes en medicina nuclear—, constituyen una tecnología de alto valor estratégico. Sin embargo, su funcionamiento implica también la generación de emisiones radiactivas que, si bien se mantienen bajo estrictos controles, demandan un análisis exhaustivo de su potencial influencia sobre el entorno ambiental y la salud de las comunidades aledañas.

Este estudio no se limita a describir parámetros físicos o a presentar valores de actividad radiológica aislados; se propone, más bien, construir una visión integral en la que convergen tres dimensiones fundamentales: la tecnológica, la ambiental y la socio-sanitaria. Desde la perspectiva tecnológica, se considera el diseño, operación y mantenimiento de los ciclotrones, elementos cruciales para determinar los niveles de exposición y la seguridad operativa. En el plano ambiental, se analizan las rutas de dispersión de radionúclidos y su interacción con los componentes del ecosistema —suelo, aire, agua y biota—. Finalmente, desde la óptica sanitaria, se evalúa la posibilidad de impactos acumulativos en poblaciones cercanas y la importancia de sistemas de monitoreo continuo que permitan garantizar el cumplimiento de los estándares internacionales de protección radiológica.

De este modo, el libro se organiza de manera progresiva y jerárquica. El **Capítulo I**

se centra en la descripción del emplazamiento, un aspecto esencial, pues el contexto geográfico, urbano y ambiental constituye el escenario sobre el cual se proyectan los potenciales efectos radiológicos. La caracterización física del lugar, la infraestructura tecnológica existente y la proximidad a zonas pobladas son factores determinantes para evaluar riesgos y definir estrategias de mitigación.

El **Capítulo II**, orientado hacia la caracterización radiológica, explora con mayor profundidad los parámetros técnicos vinculados a la actividad de los ciclotrones, estableciendo líneas de base indispensables para el análisis comparativo. El **Capítulo III** amplía la discusión mediante la monitorización radiológica, introduciendo metodologías, instrumentos y resultados de mediciones directas que permiten verificar la magnitud de las emisiones. Finalmente, el **Capítulo IV** sintetiza estos elementos en un análisis comprehensivo del impacto radiológico ambiental, integrando la evidencia empírica con consideraciones de política pública y gestión ambiental responsable.

En consecuencia, esta sección previa al desarrollo capitular cumple una doble función: por un lado, dota de claridad conceptual al lector, brindándole una visión panorámica que le permitirá comprender la lógica interna del estudio; por otro, establece las bases metodológicas y científicas que sustentan la necesidad de una investigación seria, rigurosa y contextualizada sobre los ciclotrones en el Perú. No se trata únicamente de una aproximación técnica, sino de un esfuerzo por articular ciencia, tecnología y sociedad en la construcción de una mirada crítica y propositiva hacia la protección radiológica ambiental.

MARCO LEGAL Y NORMATIVO

El presente estudio se desarrolla dentro de un marco regulatorio que otorga sustento jurídico y técnico a cada una de las acciones emprendidas en materia de seguridad radiológica, impacto ambiental y protección de la salud. La legislación nacional e internacional en torno a la gestión de fuentes radiactivas y la vigilancia del medio ambiente establece principios, obligaciones y responsabilidades que no solo orientan la práctica investigativa, sino que también garantizan la validez y pertinencia de los resultados obtenidos.

Por ello, resulta imprescindible presentar las disposiciones normativas que enmarcan esta investigación, pues ellas constituyen el soporte formal que respalda el análisis y la interpretación de los hallazgos. A través de este marco legal y normativo, se definen los límites de actuación, los criterios de evaluación y las obligaciones institucionales que rigen en torno a la radioprotección y la gestión ambiental.

Este apartado se ubica **entre la Introducción y el Capítulo 1**, funcionando como un puente necesario entre la contextualización del problema y el desarrollo teórico de la investigación. En él se detallan las normas generales vinculadas con el ambiente y la salud, así como aquellas específicas de carácter radiológico, lo que permite garantizar que el presente trabajo no solo se fundamente en un análisis científico, sino también en un estricto respeto a las disposiciones legales vigentes.

Normas ambientales nacionales

- Constitución Política del Perú de 1993.
- Ley General del Ambiente, Ley N° 28611 y su modificatoria Decreto Legislativo N° 1055.
- Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental, Ley N° 28245.

- Reglamento de la Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental -SNGA, aprobado por D.S. N° 008-2005-PCM.
- Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, Ley N° 27446, modificado por Decreto Legislativo N° 1078.
- Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental, aprobado por Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM.
- Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Ley N° 29325.

Normas de calidad ambiental y salud

- Ley General de Salud, Ley N° 26842.
- Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua – Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM.
- Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Aire, Decreto Supremo N° 074-2001-PCM.

Normas específicas de seguridad radiológica

- Ley de Regulación del Uso de Fuentes de Radiaciones Ionizantes, Ley N° 28028 (2003).
- Reglamento de la Ley 28028, Regulación del Uso de Fuentes de Radiaciones Ionizantes, Decreto Supremo N° 039-2008-EM.
- Reglamento de Seguridad Radiológica, Decreto Supremo N° 009-97-EM.
- Requisitos de Seguridad Física en Fuentes Radiactivas, Norma Técnica

SF.001.2011. (R.P. 1312-11-IPEN/PRES).

- Texto Único de Procedimientos Administrativos IPEN, Decreto Supremo 004-2013-EM.

CAPÍTULO 1

CONTEXTO TERRITORIAL Y CONDICIONES DEL EMPLAZAMIENTO

La evaluación del impacto radiológico ambiental de los ciclotrones en el Perú requiere, como punto de partida, una caracterización minuciosa del emplazamiento donde estas instalaciones se encuentran. El contexto geográfico, geológico, urbano y socioambiental no solo determina la interacción de la radiación con el entorno, sino que también condiciona los riesgos potenciales y las medidas de protección que deben adoptarse. En este sentido, la descripción del emplazamiento constituye la base metodológica para comprender los alcances reales de la exposición radiológica y sus posibles efectos en la población y en el ecosistema.

En este capítulo se presenta una aproximación integral a las condiciones físicas y sociales que rodean los ciclotrones en operación dentro del territorio nacional. Se detallan aspectos como la ubicación geográfica precisa, la accesibilidad del área, el tipo de infraestructura hospitalaria o industrial asociada, así como las características topográficas y climáticas que inciden en la dispersión de partículas y la acumulación de radiación en el medio. De igual manera, se abordan los elementos demográficos y urbanísticos, dado que la cercanía de la población, la densidad habitacional y la existencia de zonas de actividad económica son factores determinantes para dimensionar los riesgos y establecer parámetros de seguridad radiológica.

El emplazamiento de un ciclotrón no es un hecho neutro: implica una decisión estratégica que debe articularse con normas internacionales de seguridad, políticas nacionales de salud y planes de gestión ambiental. Por ello, la descripción aquí presentada no se limita a un ejercicio de ubicación espacial, sino que se orienta a evidenciar cómo las condiciones del entorno influyen en la magnitud del impacto radiológico ambiental. De esta manera, se

sientan las bases para los capítulos posteriores, donde se abordará la evaluación técnica de las emisiones, la modelización del impacto y las estrategias de mitigación necesarias para garantizar un desarrollo seguro y sostenible del uso de ciclotrones en el Perú.

Ubicación de la instalación

La instalación estudiada se encuentra ubicada en el distrito de Surquillo, provincia y departamento de Lima, República del Perú (Figuras 1 y 2).

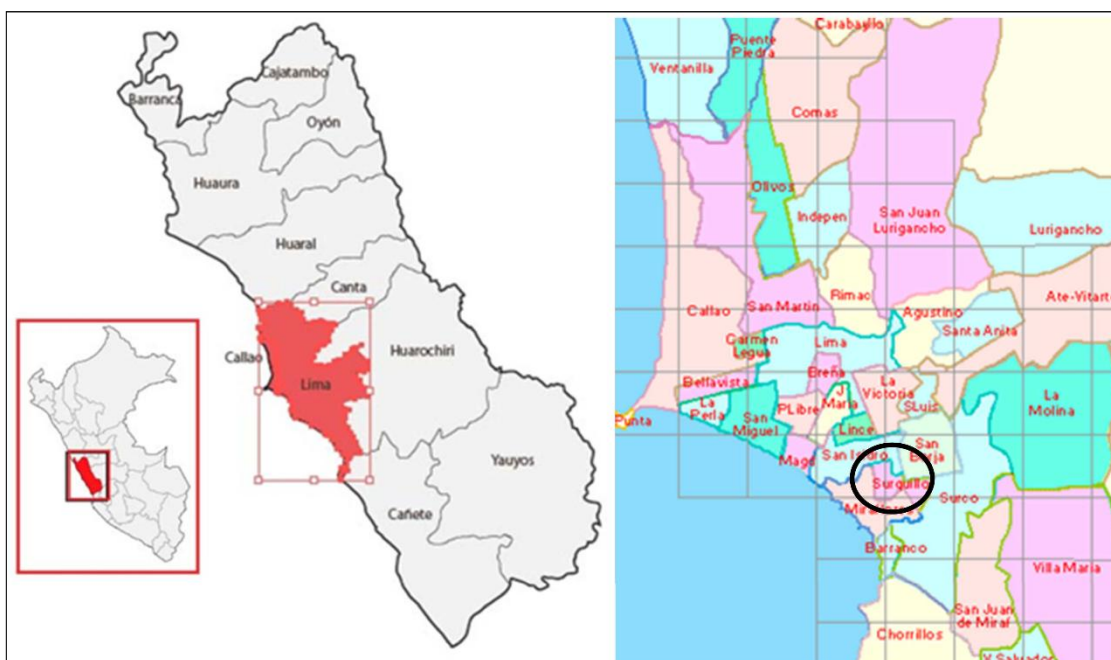


Figura 1. Ubicación del Distrito de Surquillo



Figura 2. Ubicación de la instalación

El área total del lote es de 330 m² y la zonificación municipal está destinada para el comercio zonal.

Los alrededores corresponden a zonas urbanas y comerciales. Al lado derecho de la instalación se encuentran ubicadas oficinas y al lado izquierdo, una imprenta.

En la parte posterior y alrededores se ubican predios de viviendas familiares.(Figura 3).

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de sismicidad Zona 3, existiendo la posibilidad de que ocurran sismos de alta intensidad.



Figura 3. Predios y viviendas cercanas a la instalación

Delimitación de Áreas

El emplazamiento cuenta con un área controlada y un área supervisada (Figura 4).



Figura 4. Áreas controlada y supervisada del emplazamiento

Área Controlada

El área controlada está conformada por tres ambientes:

Cuarto del Ciclotrón

Ambiente en donde está instalado: el Ciclotrón Auto blindado marca SIEMENS Eclipse HP, depósito de residuos radiactivos de bajo nivel y el banco de filtros del sistema de extracción de ventilación (Figura 5).



Figura 5. Cuarto del ciclotrón

Cuarto Limpio

En este ambiente se cuenta con dos celdas calientes blindadas para la producción, control de calidad y fraccionamiento del ^{18}F -FDG (Figura 6).

En la primera celda caliente está instalado el Explora FDG₄, el cual es el módulo de producción del ^{18}F -FDG.

En la segunda celda caliente están instalados: el sistema de control de calidad, el dispensador automático y las dos telemanipuladores empleados en la línea de producción del ^{18}F -FDG.



Figura 6. Cuarto limpio

Cuarto de Empaque y Cuarto de embalaje

Estos ambientes están destinados para empacar y embalar los contenedores de plomo que contienen las dosis dispensadas del ^{18}F -FDG, acondicionándolas en bultos del tipo A, etiqueta amarilla categoría II, para su transporte seguro. Para movilizar los contenedores y

bultos se cuenta con una faja transportadora automática (Figura 7).



Figura 7. Cuarto de empaque y cuarto de embalaje

Área Supervisada

El área supervisada está conformada por cinco ambientes:

Cuarto de Control del ciclotrón

Ambiente donde está ubicado los tableros de control del: ciclotrón, sistema de monitoreo de la radiación de los diferentes ambientes y sistema del circuito cerrado de televisión de la instalación.

Laboratorio de control de calidad y Almacén de materias primas

Destinado para los ensayos de control de calidad y almacenamiento de los reactivos químicos e insumos no radiactivos empleados en la producción del ^{18}F - FDG. En estos ambientes están instaladas mesadas de trabajo de piedra sintética lisa y equipos de laboratorio convencionales (Figura 8).

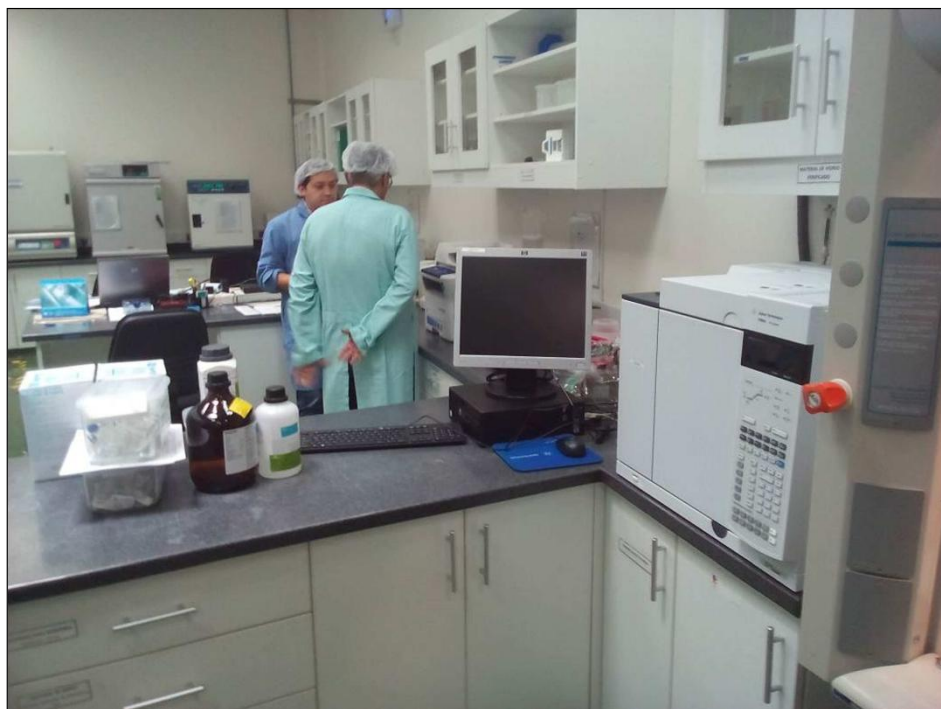


Figura 8. Laboratorio de control de calidad

Sala de máquinas de soporte del ciclotrón

Ambiente en donde están ubicadas las máquinas eléctricas convencionales como transformador eléctrico, baterías y UPS.

Depósito de balones de gas

Ambiente donde están instalados los balones de gases que han de emplearse en el proceso productivo del ^{18}F -FDG, como son; Nitrógeno, Argón, Helio e Hidrógeno.

Estacionamiento y zona de control de ingreso

Zonas destinadas para estacionamiento de vehículos estrictamente autorizados, tanto para el transporte del personal y del material radiactivo, así como el control de ingreso principal a las instalaciones (Figura 9).



Figura 9. Estacionamiento y zona de control de ingreso

Equipamiento relevante

Ciclotrón

El emplazamiento cuenta con un ciclotrón autoblandado marca Siemens, tipo Eclipse HP. Su energía de protones de iones negativos es de 11 MeV y la intensidad de corriente por línea de irradiación es de 60 μ A. Cuenta con dos líneas de irradiación (Figura 10)

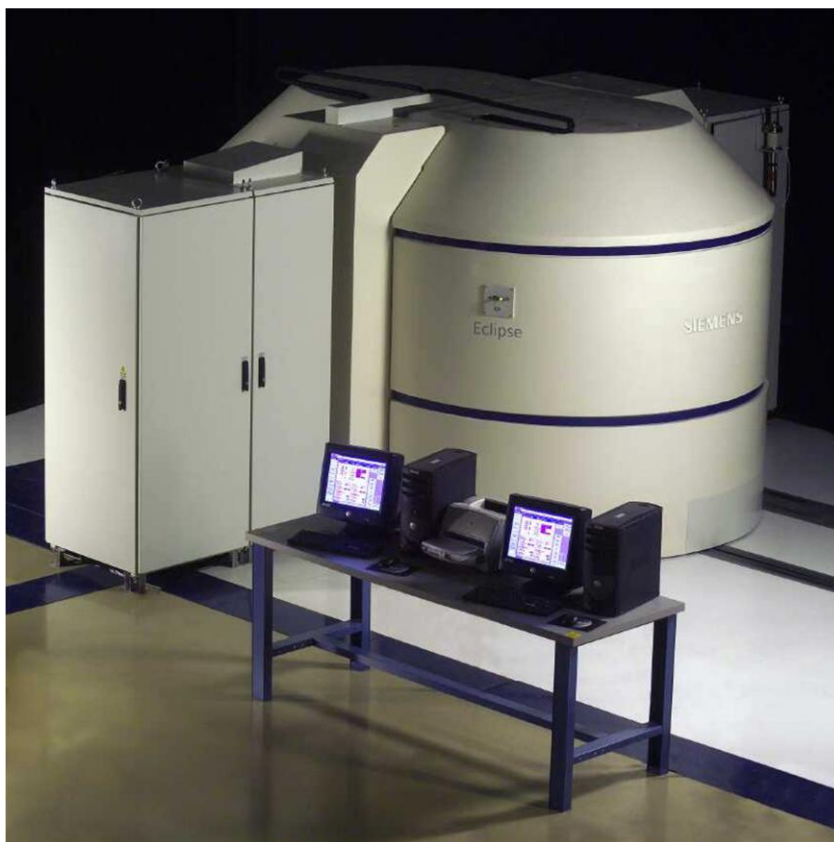


Figura 10. Ciclotrón autoblandado Siemens

Celdas calientes

La instalación cuenta con dos celdas calientes (Figura 11).

En la primera celda caliente está instalado el Explora FDG₄, el cual es el módulo de producción del ¹⁸F-FDG.

En la segunda celda caliente están instalados: el sistema de control de calidad, el dispensador automático y los dos telemanipuladores empleados en la línea de producción del ¹⁸F-FDG.



Figura 11. Celda caliente

Módulo Explora FDG4

El módulo Explora FDG4 (Figura 12) tiene un alto rendimiento y convierte el ^{18}F en ^{18}F FDG. Es capaz de realizar hasta cuatro producciones secuenciales de FDG con una sola configuración, maximizando así la producción ^{18}F FDG y reducir al mínimo la exposición del operador a la radiactividad. Realiza hasta cuatro producciones secuenciales de la FDG.

Los tiempos de síntesis son de 45-minutos con menos de 40 minutos de limpieza automática entre los ciclos de producción.

Acepta hasta 9 Ci (333GBq) de ^{18}F . Es manejado mediante un software basado en Windows Microsoft. El peso es de aproximadamente 125 libras (56,7 kilogramos).



Figura 12. Módulo Explora FDG4

Descripción del proceso productivo

- Irradiación con protones los blancos de agua enriquecido en ^{18}O en el acelerador de partículas Ciclotrón SIEMES Eclipse HP de 11 MeV, a ser instalado en el cuarto del ciclotrón.
- Transferencia automática del blanco irradiado conteniendo ^{18}F hacia la primera celda caliente, en donde estará instalado el módulo de producción del ^{18}F -FDG. La transferencia se realizará empleando la presión del gas de helio sobre el blanco a través de ductos subterráneos blindados hasta el módulo de producción Explora FDG4. Esta primera celda caliente estará instalada en el cuarto limpio.
- Terminada la producción en la primera celda caliente del ^{18}F -FDG, ésta será transferida a la segunda celda caliente conexas a la primera celda

caliente. La transferencia se realizará empleando la presión del gas de argón sobre el producto a través de ductos hasta la segunda celda caliente. En esta segunda celda caliente se realizará el control de calidad del producto final y se fraccionará en diferentes dosis de acuerdo a requerimientos del usuario final en medicina nuclear. Esta segunda celda caliente estará ubicada también en el cuarto limpio.

- El producto fraccionado en dosis dentro de viales tipos penicilina o jeringas herméticas serán introducidas en blindajes de plomo, para luego ser transferidos al cuarto de empaque, para el acondicionamiento del contenedor dentro del bulto de transporte. Luego, éste será transferido al cuarto de embalaje para su etiquetado para el transporte seguro del bulto hasta el usuario final.

Descripción del entorno

El Distrito de Surquillo fue creado por Ley N° 11058 el 15 de Julio 1949. Se ubica a 105 m.s.n.m. con una superficie de 4'490,000 metros cuadrados (4,4 km²). Se encuentra situado en la zona Central-Sur-Oeste de Lima en los -12,109167° de latitud sur y -77,003611° de longitud oeste. La población estimada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) para el año 2007 es de 89283 habitantes. Está ubicado a 13 kilómetros de distancia de Lima, recorrido que se cubre en aproximadamente 25 minutos, usando la Vía Expresa.

Limita al norte con el Distrito de San Isidro y el Distrito de San Borja, al este con el Distrito de Santiago de Surco y al sur y oeste con el Distrito de Miraflores, la instalación se encuentra ubicada en uno de los límites dado que se localiza a tres cuadras del Distrito de Miraflores. Antes de 1950, Surquillo pertenecía al Distrito de Miraflores del cual se separaría por ser un distrito muy grande para ocuparse de las necesidades de su población cada vez más creciente. Pero luego en 1983, Surquillo perdió más de la mitad de su territorio, cuando

el distrito de San Borja fue creado en la parte norte del mismo debido a las mismas razones.

Surquillo aparece en los mapas como la combinación de una zona trapezoidal y un área triangular apuntando hacia abajo, con la Avenida Tomás Marsano como su divisoria (Figura 13).



La zona trapezoidal, que vendría a ser la parte norte y la más conocida del distrito; es la parte más poblada del distrito (donde se presentan problemas de drogadicción y alta inseguridad); aquí conviven la zona antigua de Surquillo con urbanizaciones populares como "Villa Victoria" o "Casas Huertas", sin embargo, es la parte más activa comercialmente y cada vez más desarrollada (Figura 14).

Esta zona además corresponde a las urbanizaciones "Barrio Médico", límite con el Distrito de Miraflores, y "Limatambo", límite con el Distrito de San Isidro y el Distrito de San Borja, consta de parques, modernos edificios, amplias casas habitadas por personas con alto poder adquisitivo, representan la parte moderna y más residencial del distrito, además

sus conjuntos habitacionales son generalmente para personas solas o recién casados por la mínima cantidad de metros cuadrados.

La zona triangular, que limita con el Distrito de Santiago de Surco y el Distrito de Miraflores, es una zona mayormente residencial de nivel socioeconómico medio alto que se asemeja a estos dos distritos, por su distribución, zona que tiene como principales arterias las avenidas Aviación y Villarán siendo sus principales urbanizaciones "La Calera ", "El Pedregal" "Los Sauces" "La Calera de Monterrico", ocupa la parte sur del distrito

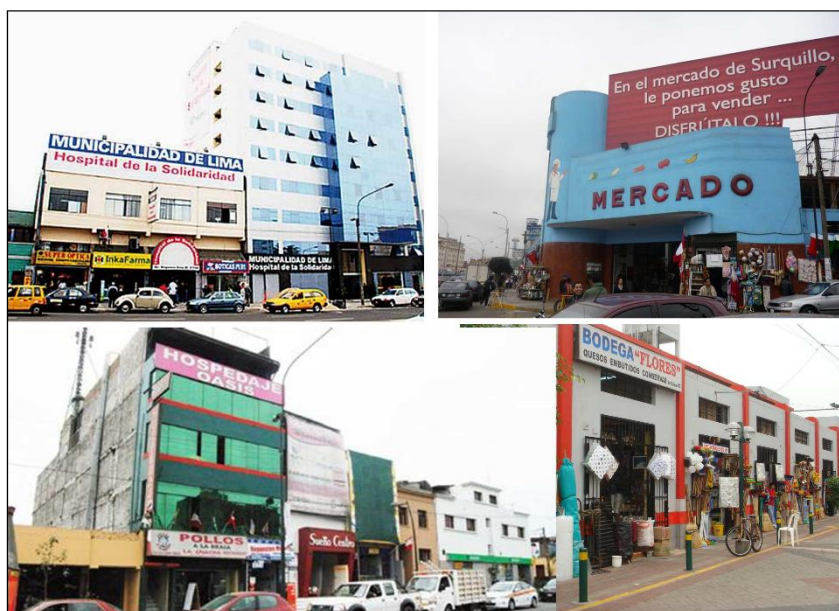


Figura 14: Actividades económicas cercanas al emplazamiento

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS Y PARÁMETROS DE LA CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA

El análisis del impacto radiológico ambiental de los ciclotrones exige comprender, con rigor científico, las fuentes y magnitudes de radiación asociadas a su funcionamiento. La caracterización radiológica constituye, por tanto, un eje central en la evaluación, pues permite identificar el tipo de emisiones presentes, su comportamiento en el medio, así como los posibles riesgos que representan para la salud humana y el ecosistema.

En este capítulo se desarrollan los fundamentos técnicos de la radiación emitida durante las operaciones de los ciclotrones. Se aborda la naturaleza de los radionúclidos producidos, los mecanismos de generación de partículas secundarias y la liberación de fotones de alta energía, analizando tanto su intensidad como su distribución espacial y temporal. Esta caracterización no solo considera la radiación directa asociada al funcionamiento del acelerador, sino también la radiación residual producto de reacciones nucleares inducidas en materiales estructurales y en los blancos utilizados para la producción de radioisótopos.

Asimismo, se establecen los parámetros de medición y monitoreo radiológico que permiten evaluar la magnitud de la exposición. Para ello, se incluyen los métodos de detección más empleados, la periodicidad de las mediciones y los indicadores internacionales de referencia que sirven como punto de comparación para los niveles observados en el contexto peruano. La caracterización radiológica, además, incorpora la modelización de dispersión de contaminantes radiactivos en aire, agua y suelo, considerando la interacción con las condiciones ambientales específicas del emplazamiento descrito en el capítulo anterior.

La importancia de esta sección radica en que proporciona la base empírica y cuantitativa para dimensionar el impacto radiológico. Sin un conocimiento preciso de las emisiones y su dinámica, cualquier evaluación de riesgo quedaría incompleta. Por ello, este capítulo no solo describe, sino que también interpreta los datos radiológicos, estableciendo umbrales críticos y escenarios de exposición que servirán como referencia en los análisis posteriores de impacto y en la propuesta de medidas de protección radiológica.

Producción de radionúclidos

La instalación se encuentra exclusivamente dedicada a la producción de ^{18}F y síntesis de ^{18}F -FDG (2,2-desoxi-2- ^{18}F -flúor-D-glucosa).

La producción se lleva a cabo por irradiación con protones de agua enriquecida con oxígeno, $[\text{H}_2^{18}\text{O}]$, mediante la reacción nuclear $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ como una forma efectiva y conveniente de producción del ^{18}F en grandes cantidades (Figura 15).

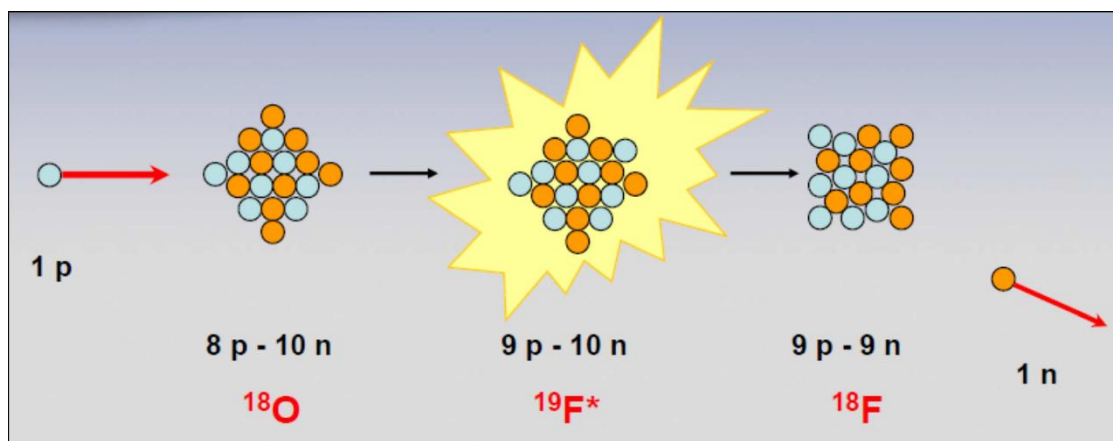


Figura 15. Producción de ^{18}F

El ^{18}F es un emisor β^+ con una energía media de $249,8 \pm 0,6$ keV y una intensidad de $96,73 \pm 0,04$ %. Por reacción de aniquilación emite un fotón gamma de 511 keV con una intensidad de $193,46 \pm 0,08$ %.

Este radionúclido tiene un periodo de semidesintegración de $109,77 \pm 0,05$ minutos y decae al isótopo estable ^{18}O .

El material radiactivo producido en el ciclotrón se transfiere a un laboratorio con celdas calientes donde se sintetiza y fracciona el radiofármaco.

La síntesis de la $[^{18}\text{F}]\text{-FDG}$ se trata de una sustitución nucleofílica que incorpora el anión $^{18}\text{F}^-$ en la posición 2 de un análogo de la glucosa y se somete a procesos de purificación e hidrólisis.

Producción mensual de ^{18}F

Durante el periodo comprendido de septiembre 2016 a febrero 2017, la instalación ha producido $2,19\text{E}+05$ miliCuries de ^{18}F con una tasa promedio mensual de $3,66\text{E}+04 \pm 6,44\text{E}+03$ mCi (Figura 16).

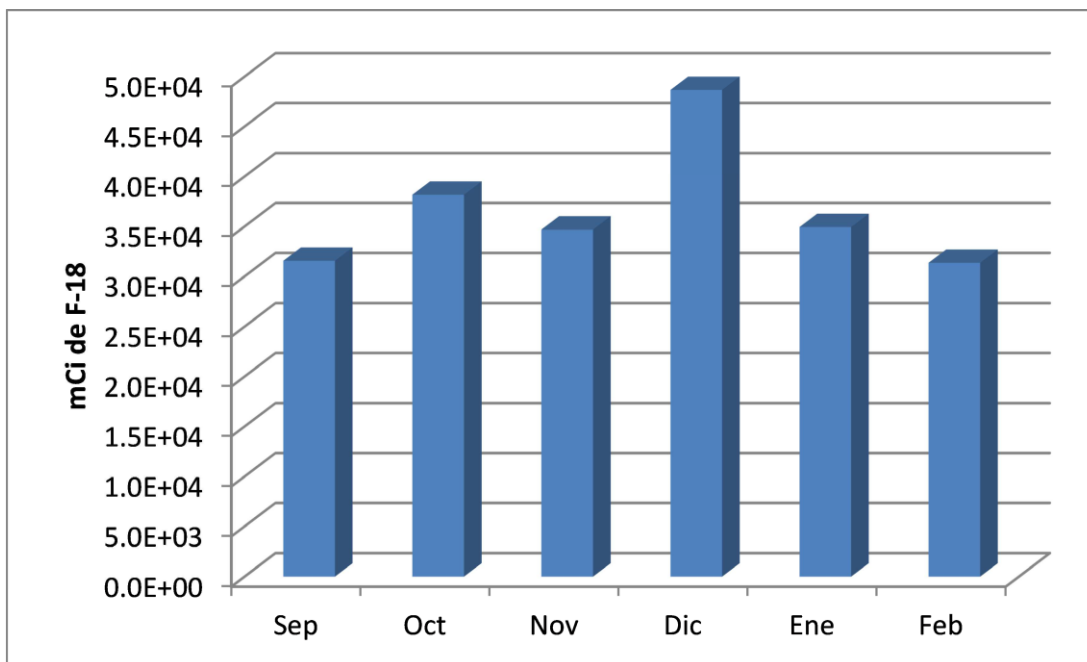


Figura 16. Producción total de ^{18}F (Periodo Sep-16 a Feb-17)

De la producción total de ^{18}F generada durante el periodo septiembre 2016 a febrero 2017, el porcentaje promedio mensual fraccionado fue de $58,8\% \pm 3,6\%$ (Figura 17).

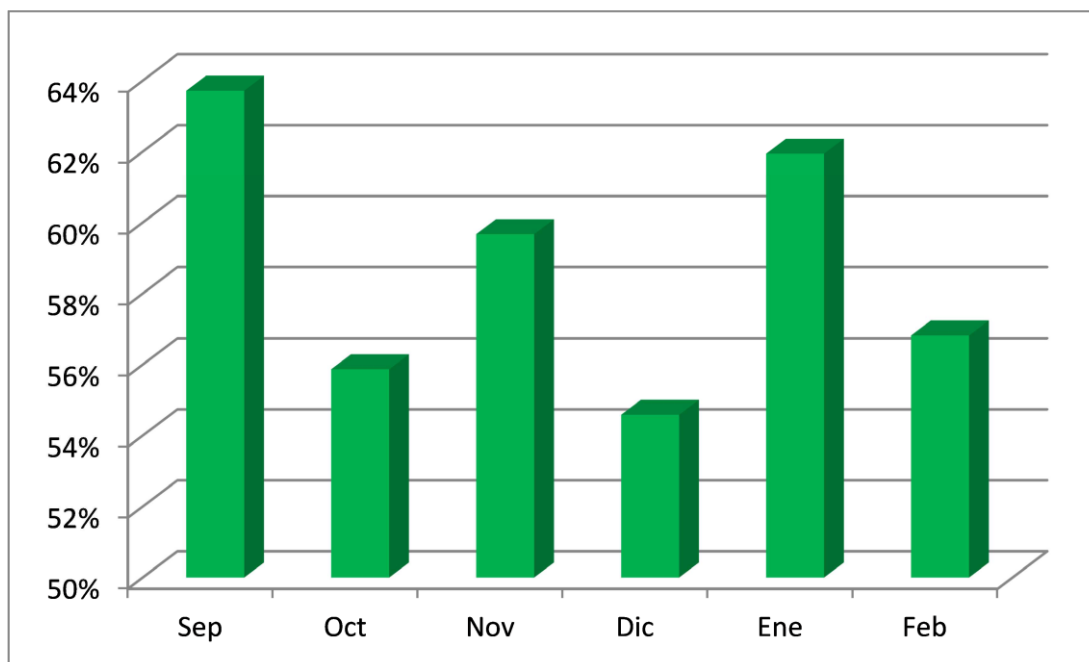


Figura 17. Porcentaje fraccionado de ^{18}F (Periodo Sep-16 a Feb-17)

Caracterización radiológica de las descargas atmosféricas

Con la finalidad de verificar cualitativamente las descargas de radionúclidos al ambiente por parte de la instalación, se colocaron dispositivos de carbón activado en cuatro puntos tomando como referencia la dirección predominante del viento (Figuras 18 y 19).

El objetivo primordial fue la verificación de que ningún otro radionúclido aparte del ^{18}F es liberado al ambiente durante los procesos de producción y síntesis.

Los dispositivos fueron colocados un día previo a la producción y retirados inmediatamente después del proceso de síntesis.

Estos dispositivos fueron analizados por un sistema de espectrometría gamma de centelleo sólido portátil compuesto de un detector NaI(Tl) de 3"x3" asociado a un módulo

multicanal Inspector 2000 marca Canberra.

La evaluación de los espectros se llevó a cabo con el programa Genie 2000 marca Canberra.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la evaluación radiométrica realizada, pudiendo verificar la liberación de ^{18}F en la boca de la chimenea de la instalación mediante la presencia de un fotopeak de 511 keV en el espectro obtenido (Figuras 20 y 21).

Dos dispositivos no presentaron evidencia de ningún radionúclido, ni siquiera del ^{18}F ; esto debido a que después de la boca de la chimenea los procesos de dispersión del material radiactivo no permitieron que se depositara sobre los dispositivos de carbón activado (Figura 22).

En conclusión, se verificó que el único radionúclido liberado al ambiente es el ^{18}F y que por los procesos meteorológicos no ocurre deposición significativa sobre los techos de las diferentes áreas de la instalación.



Figura 18. Instalación de dispositivo de carbón activado en la chimenea

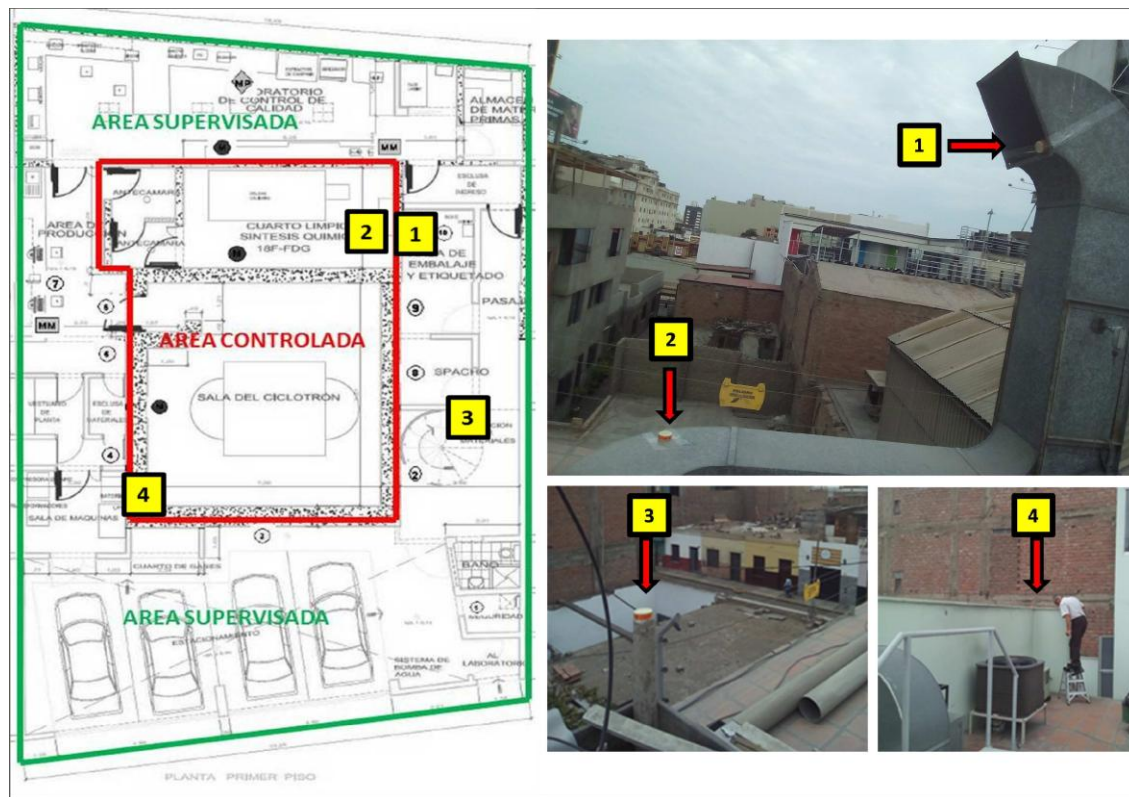


Figura 19. Ubicación de dispositivos de carbón activado en la instalación

Ciclotrones y Radiación Ambiental

Evaluación del Impacto Radiológico en el Perú

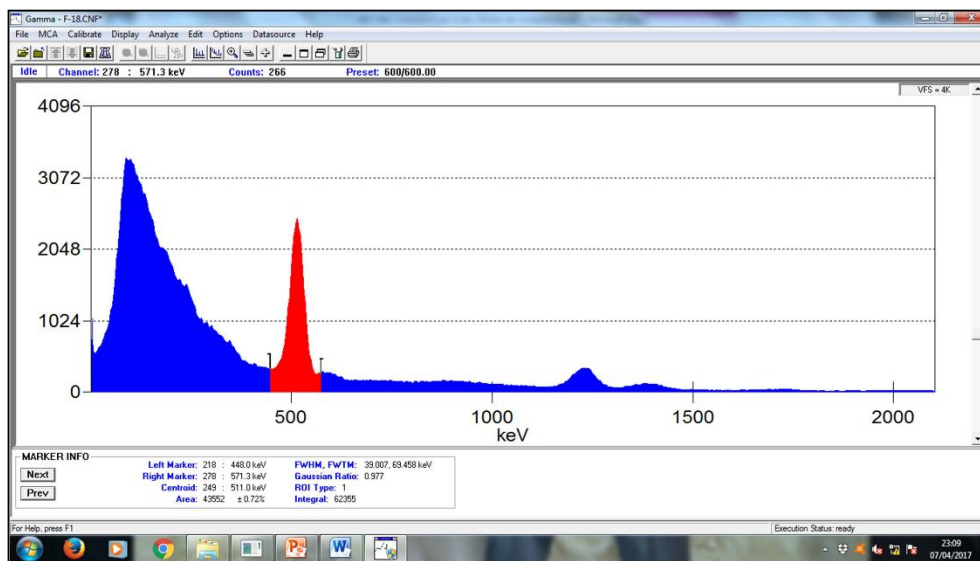


Figura 20. Material de referencia con ^{18}F

Ciclotrones y Radiación Ambiental

Evaluación del Impacto Radiológico en el Perú

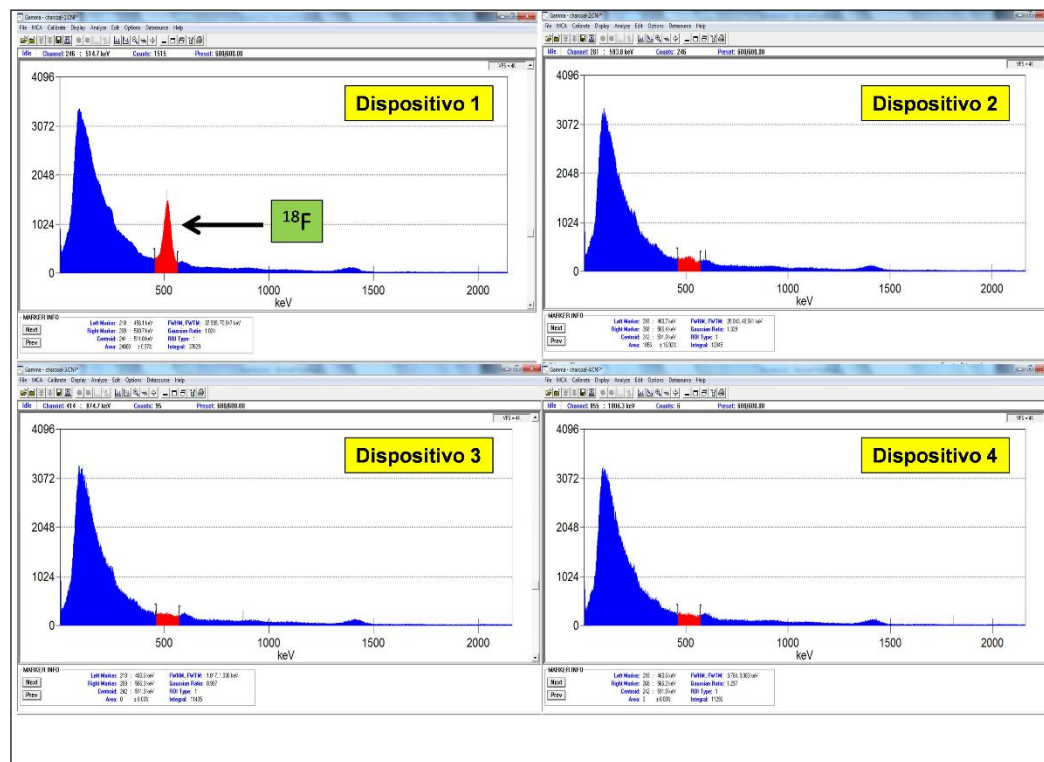


Figura 21. Espectrometría gamma en dispositivos de carbón activado

Tabla 1. Evaluación de los dispositivos de carbón activado

Dispositivo	1	2	3	4
Tiempo lectura (m)	10	10	10	10
Energía (keV)	511	511	511	511
Área neta	24860	1056	0	0
Nucleído	F-18	F-18	ND	ND

ND: No detectado

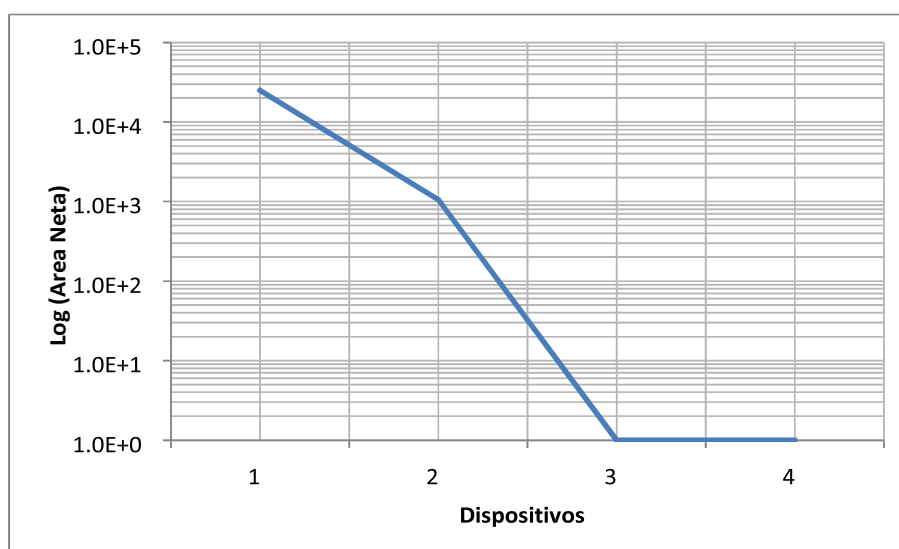


Figura 22. Variación de actividad en dispositivos de carbón activado

Caracterización radiológica de las descargas líquidas

En líneas generales, el proceso no genera descargas líquidas que se vierten al sistema de alcantarillado de la zona, sin embargo, con la finalidad de verificar la presencia o ausencia de radionúclidos en el desagüe de la instalación, se tomaron muestras de 4 litros para el análisis cualitativo gamma (Figura 23).



Figura 23. Muestreo de agua en la instalación

La evaluación en tiempo real por espectrometría gamma de centelleo sólido evidenció la ausencia de radionúclidos como el ^{18}F u otros emisores gamma de importancia para el público y medio ambiente.

CAPÍTULO 3

ESTRATEGIAS Y TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN RADIOLÓGICA

La evaluación de impacto radiológico ambiental no puede entenderse sin un sistema de monitorización constante, preciso y confiable. La radiación ionizante, por su naturaleza invisible e imperceptible a los sentidos humanos, exige ser medida mediante instrumentos especializados que permitan detectar, registrar y analizar sus variaciones en el tiempo y en el espacio. En este contexto, la monitorización radiológica se convierte en una herramienta esencial para garantizar la seguridad de los trabajadores, de la población circundante y del medio ambiente.

En este capítulo se presentan los principios, técnicas y procedimientos utilizados en la vigilancia radiológica aplicada a los ciclotrones en el Perú. Se describen los equipos de medición más empleados —como dosímetros personales, monitores de área, detectores de radiación gamma y dispositivos de muestreo ambiental— y se detalla cómo cada uno de ellos contribuye a establecer un panorama completo de las condiciones radiológicas. Asimismo, se analizan los criterios de selección de los puntos de monitoreo, su periodicidad, la confiabilidad de los datos obtenidos y los protocolos de calibración y control de calidad que garantizan la trazabilidad de los resultados.

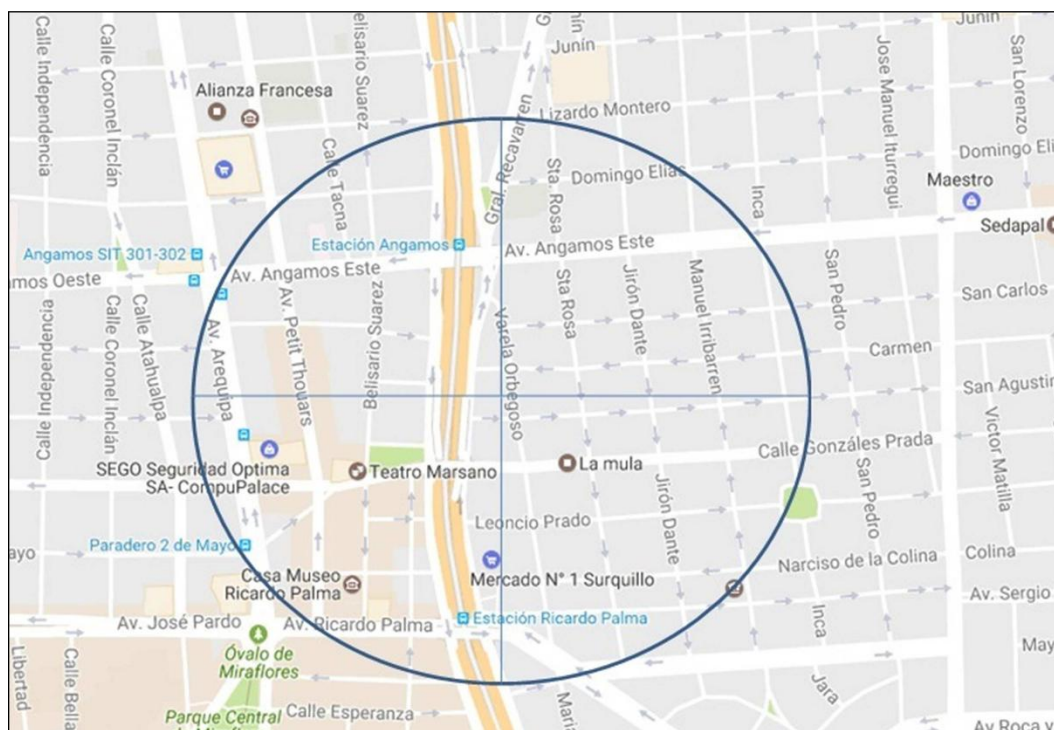
La monitorización radiológica no solo tiene un carácter técnico, sino también preventivo y normativo. Sus resultados constituyen la base para la verificación del cumplimiento de los límites de dosis establecidos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y por la normativa nacional vigente. Además, permite identificar tendencias de exposición, anticipar posibles incidentes y diseñar planes de mitigación que reduzcan los riesgos asociados al funcionamiento de los ciclotrones.

De este modo, este capítulo ofrece una visión integral de cómo la monitorización radiológica se inserta en el proceso de gestión de la seguridad nuclear y radiológica. Más que una actividad rutinaria, constituye un pilar de confianza para la sociedad, pues asegura que el avance científico y tecnológico representado por los ciclotrones se desarrolle dentro de un marco de responsabilidad y sostenibilidad.

Determinación del área de influencia

Para la determinación del área de influencia y el área crítica de impacto radiológico en la población y medio ambiente, se tomó en consideración información relacionada con la cartografía, población, vivienda y meteorología del distrito.

Tomando como punto central la instalación de Ciclotrón Perú, se delimita un área circular con un radio de 0,5 km y una superficie de 0,78 km² (Figura 24).



Dentro de los principales lugares de importancia económica se tienen al Mercado N° 1 de Surquillo, los centros comerciales de la Av. Angamos Este, La Estación Ricardo Palma del Metropolitano, El Hospital de la Solidaridad de Surquillo, la Av. Ricardo Palma, la galería comercial CompuPalace y el Teatro Marsano.

Variables meteorológicas

Se recolectó información meteorológica durante el periodo comprendido entre el 10y 18 de marzo del año 2017, tiempo dentro del cual se realizó el proceso de monitorización radiológica durante la etapa de operación de la instalación.

Considerando que el proceso de producción y síntesis se lleva a cabo entre las 5:00 y 8:00 horas, se pudo verificar que es el periodo en donde la temperatura alcanza los menores rangos del día con valores medios comprendidos entre 23,9

°C y 24,0 °C (Figura 25).

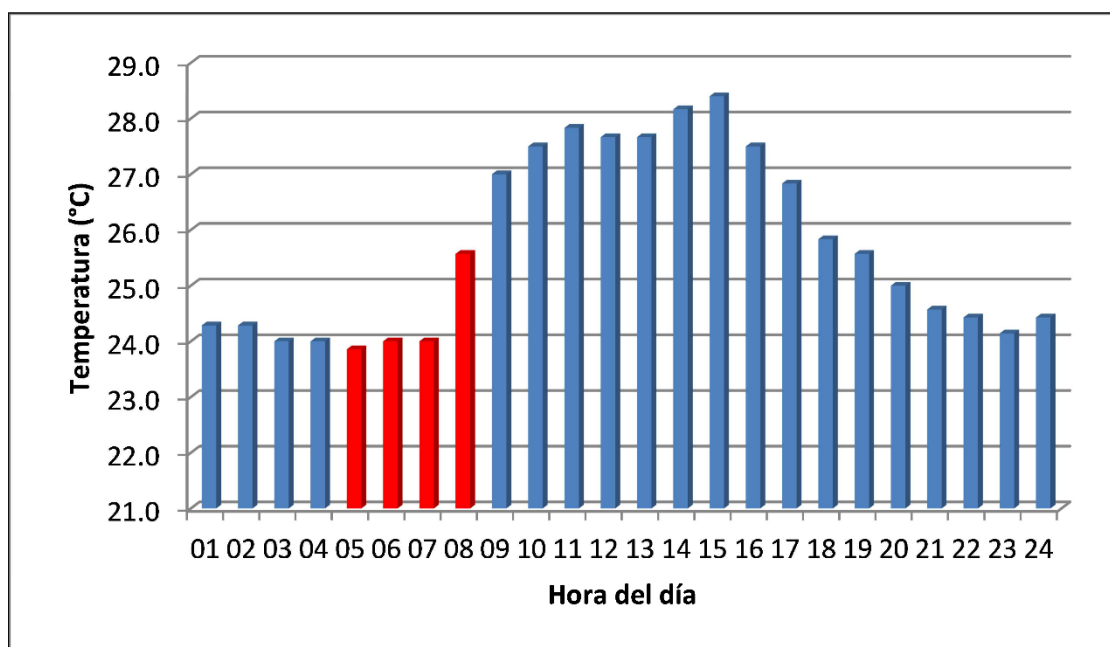


Figura 25. Temperatura media horaria

Asimismo, se verificó que los valores altos de humedad relativa se presentan durante las horas de producción y síntesis, con un rango comprendido entre 72,3% y 82,0% (Figura 26).

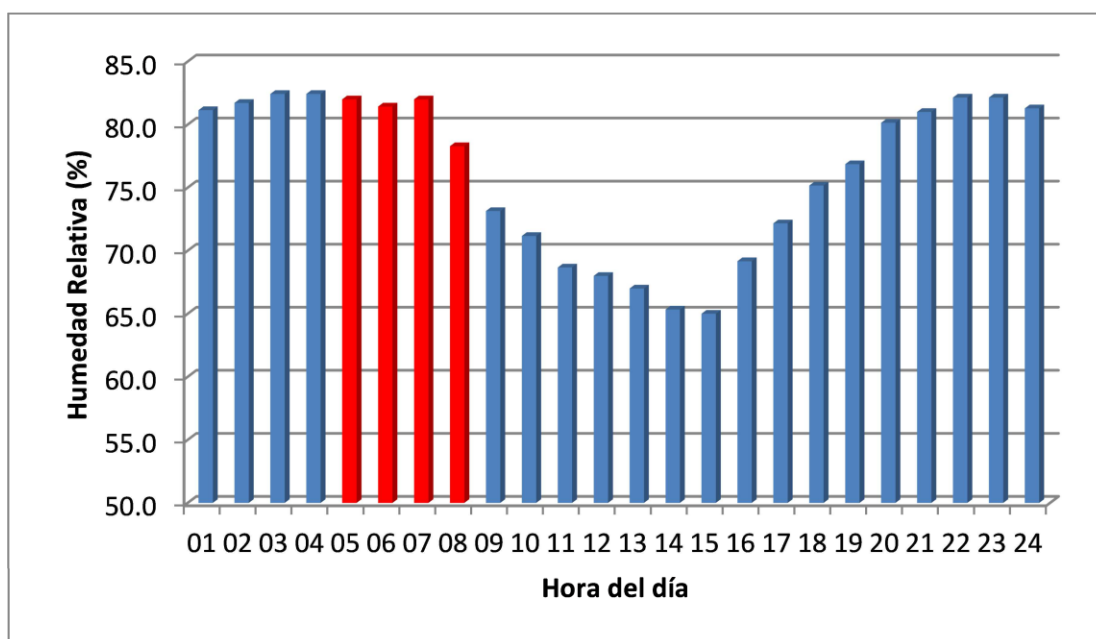


Figura 26. Humedad relativa media horaria

Una de las variables meteorológicas más importantes la constituye la velocidad del viento, dado que es un elemento muy importante en los procesos de dispersión atmosférica de contaminantes.

Durante el periodo de estudio, se pudo observar que la mayor velocidad de viento en la zona se presenta a partir de las 10:00 horas, llegando a su máximo valor a las 17:00 horas.

En cambio, se puede observar que durante el proceso de producción y síntesis, se presentan los valores más bajos del día llegando a un promedio máximo de 1,8 m/s (Figura 27).

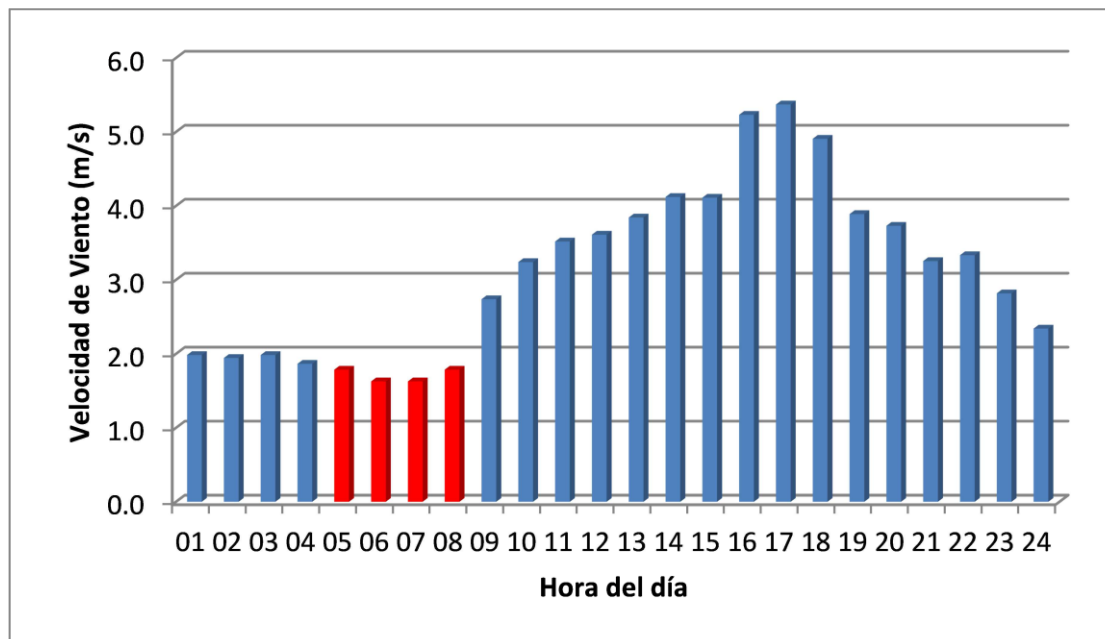
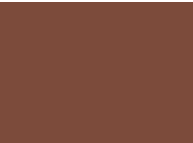


Figura 27. Velocidad de viento media horaria

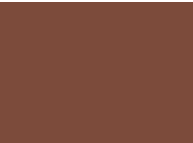
Mediante la aplicación del software WRPLOT View, se procedió a elaborar la rosade vientos correspondiente, pudiendo observarse una mayor tendencia en las direcciones Sur y Sur-Oeste (Figura 28).

Esto significa que el viento viene desde esas direcciones y se dirige a los sectores Norte y Nor-Este de la instalación.

De esta manera, se confirma que los vientos proceden del Oeste (Mar de Grau), atraviesan el Distrito de Miraflores y llegan al Distrito de Surquillo siguiendo su dirección hacia San Borja y San Isidro (Figura 29).



100



100

Determinación al área crítica de impacto radiológico

En función de la velocidad y dirección de vientos y considerando que las principales descargas al ambiente proceden de la chimenea de la instalación, se ha definido como área crítica de influencia al cuadrante ubicado en dirección nor-este de la instalación.

Esta área comprende las viviendas ubicadas en las avenidas Domingo Elías, Angamos Este, Varela Orbegoso, Santa Rosa, Jirón Dante, Manuel Iribarren y la avenida Inca con un área total de 0,195 km². No se incluye el Mercado N° 1 de Surquillo pues se encuentra fuera de la influencia de la dirección del viento (Figura 30).

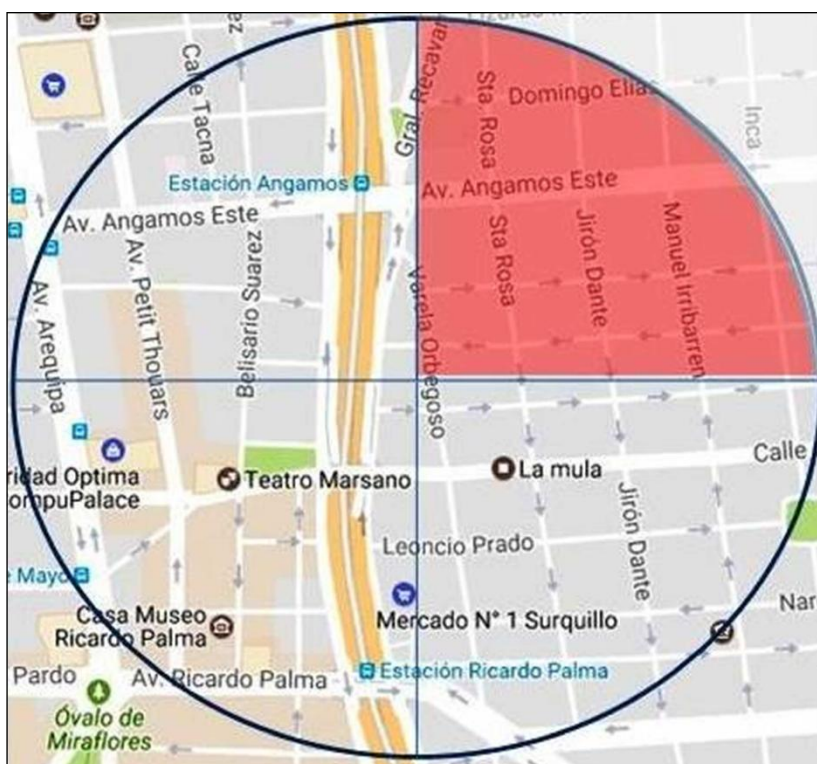


Figura 30. Área crítica de impacto radiológico

El área crítica no incluye un mayor ángulo en dirección norte debido a que la instalación limita por ese sector con un edificio de cuatro pisos edificio y un hotel de ocho pisos ubicado en la Av. El Carmen; asimismo, la orientación de la chimenease encuentra contraria a la dirección del viento, por lo tanto, no es posible una mayor dispersión de viento y sus probables descargas hacia el sector nor-oeste (Figura 31).



Figura 31. Ubicación de edificios en dirección norte respecto al punto dedescarga

Según datos del Observatorio Nacional de Seguridad Ciudadana del Ministerio del Interior (OBNASEC) y del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), la densidad poblacional del Distrito de Surquillo es de 26418,79 habitantes por km².

Por lo tanto, el área crítica tendrá aproximadamente una población de 5152 habitantes.

Durante la etapa de operación del ciclotrón, el personal de protección radiológica de la empresa llevó a cabo la lectura de la tasa de equivalente de dosis ambiental (H^*10) en diez puntos ubicados alrededor del área controlada. Los valores obtenidos fueron tabulados y procesados por el método de interpolación de Kriging con la finalidad de obtener las curvas de nivel dosimétrico correspondientes (Figura 32).

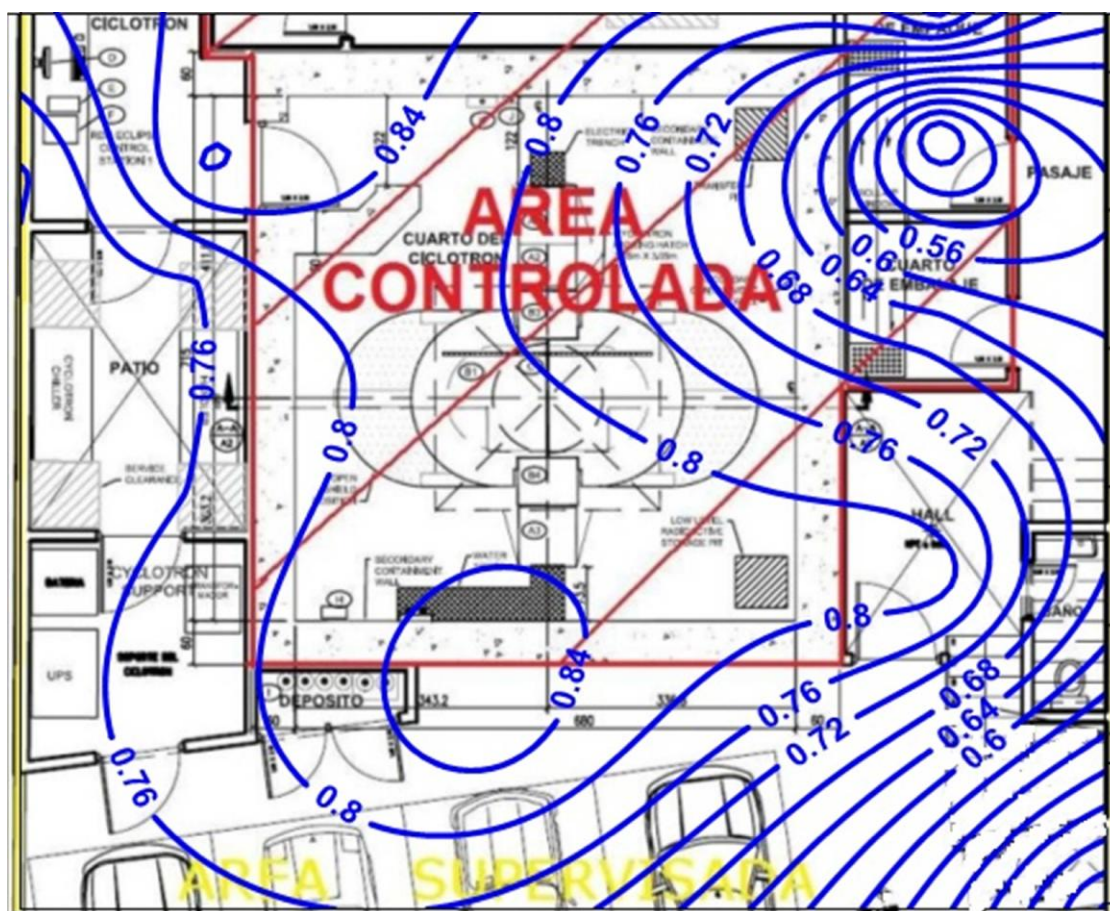


Figura 32. Tasa de equivalente de dosis ambiental en el interior de la instalación
($\square$ Sv/h)

Las curvas de nivel muestran una tasa de equivalente de dosis ambiental para el sector de control de ingreso de 0,44 $\mu\text{Sv/h}$ y alcanza su máximo valor en dos puntos cercanos al ciclotrón, con 0,84 $\mu\text{Sv/h}$.

Las tasas de equivalente de dosis ambiental $H^*(10)$ en los exteriores de la instalación se llevó a cabo por parte del equipo de muestreo ambiental del IPEN, utilizando para ello monitores de exposición PRD marca Thermo Scientific, modelo RadEye; calibrados por el Laboratorio Secundario de Calibraciones Dosimétricas del IPEN (Figura 33).

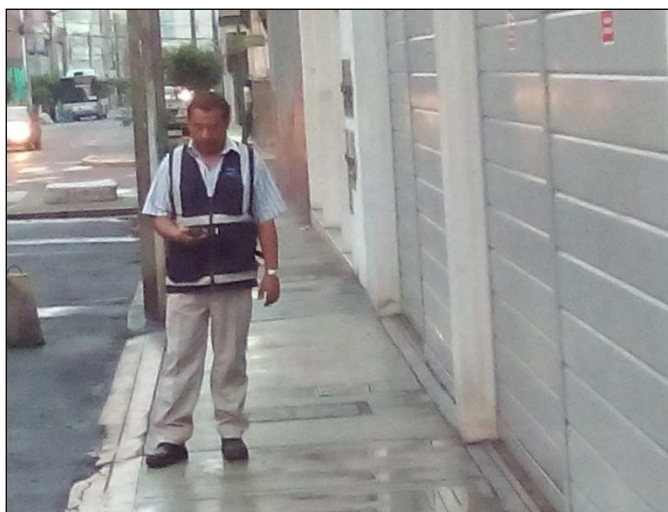
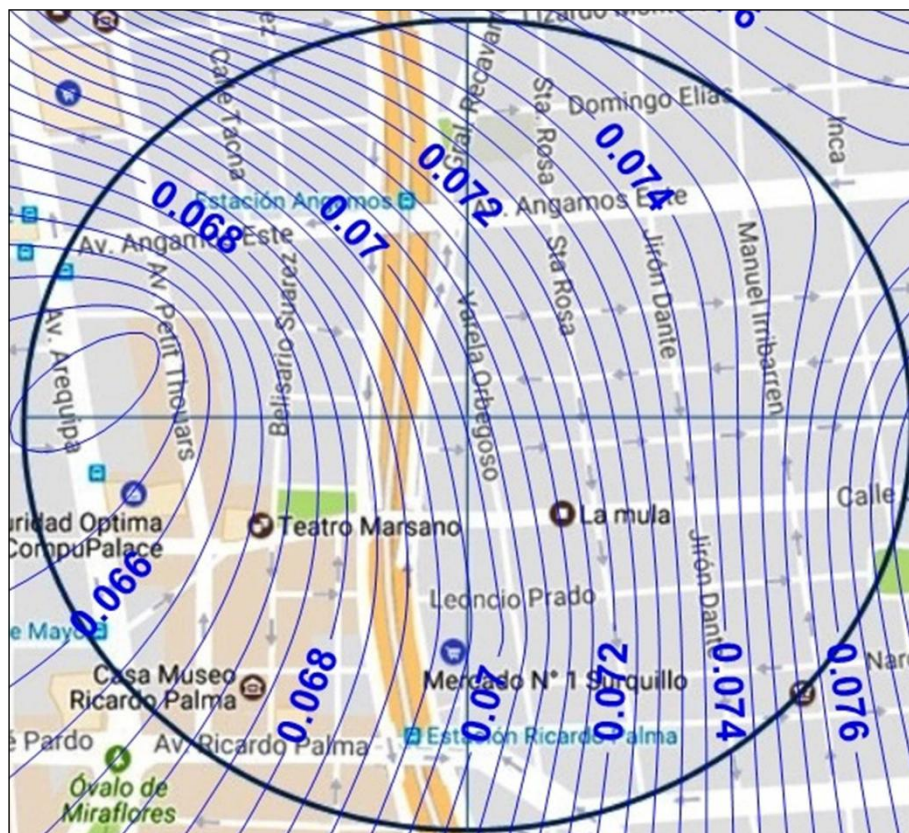


Figura 33. Lecturas exteriores con monitor PRD (2017)

Los resultados obtenidos muestran valores comprendidos entre 0,066 y 0,076

$\mu\text{Sv/h}$ con un promedio de 0,07 $\mu\text{Sv/h}$. Se puede observar que, dentro del rango de resultados, los mayores valores se encuentran alejados de la instalación y en general todos los valores son diez veces menores que los encontrados en el interior de la instalación por lo que se puede afirmar que corresponde al fondo radiactivo natural de la zona (Figura 34).



Descargas atmosféricas de ^{18}F

Entre enero y marzo del año 2017, la empresa realizó la evaluación de las descargas al ambiente de ^{18}F a través de la chimenea de la instalación (Figura 35); los cálculos fueron efectuados mediante el empleo de dos detectores calibrados por el Laboratorio Secundario de Calibraciones Dosimétricas del IPEN en el año 2016.



Figura 35. Chimenea de la instalación

El proceso de síntesis y evacuación de descargas por la chimenea se lleva a cabo durante un tiempo aproximado de 22 segundos.

La velocidad de salida de las descargas de la chimenea para el periodo de monitorización fue de $4,06 \pm 0,46$ m/s (Figura 36) y el total de actividad de ^{18}F descargada al ambiente fue de $5,25\text{E}+05 \pm 2,87\text{E}+05$ Bequerelios (Bq); aproximadamente 14,9 microCuries (mCi) por evento (Figura 37).

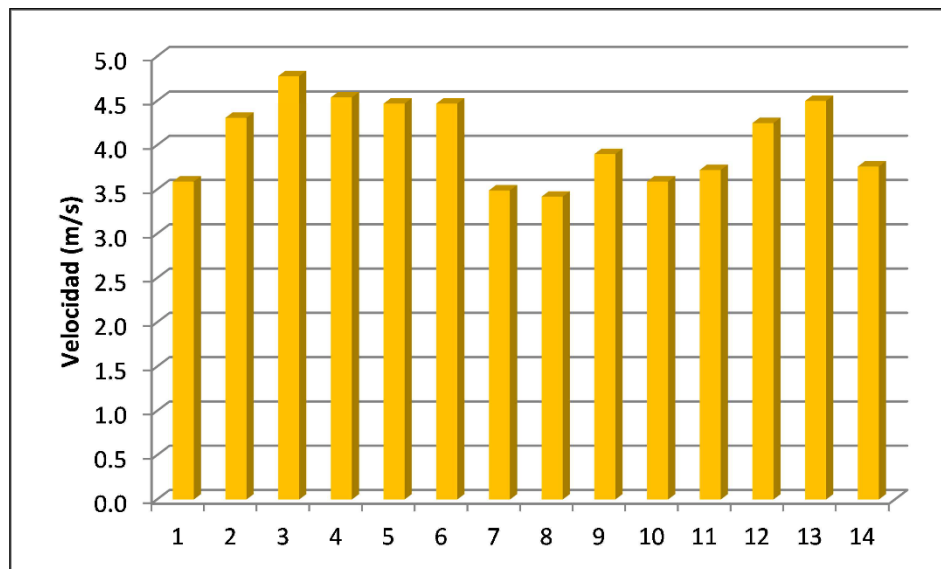


Figura 36. Velocidad de descarga de la chimenea durante el proceso de producción y síntesis (Enero - Marzo 2017)

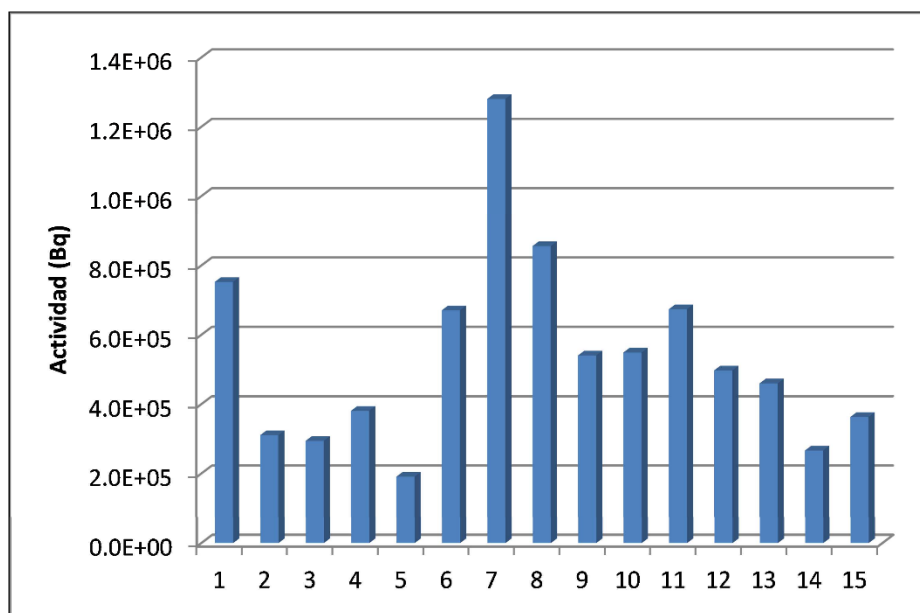


Figura 37. Actividad global de ^{18}F descargada al ambiente durante el proceso de producción y síntesis (Enero – Marzo 2017)

Monitorización ambiental

El plan de monitorización ambiental incluye la colecta y análisis en tiempo real de muestras de aire, suelo y vegetación, tomados durante el proceso de producción y síntesis, con la finalidad de identificar la presencia de radionúclidos descargados al ambiente por parte de la instalación.

Las muestras de aire se tomaron con un muestreador personal marca Fisher conectado durante el lapso de tiempo en donde se produce la descarga de ^{18}F luego del proceso de síntesis.

Se tomaron muestras de suelo superficial de 400 cm^2 cada una y muestras de vegetación de la zona (hojas de ficus y grass) antes y después del proceso de producción (Figura 38).

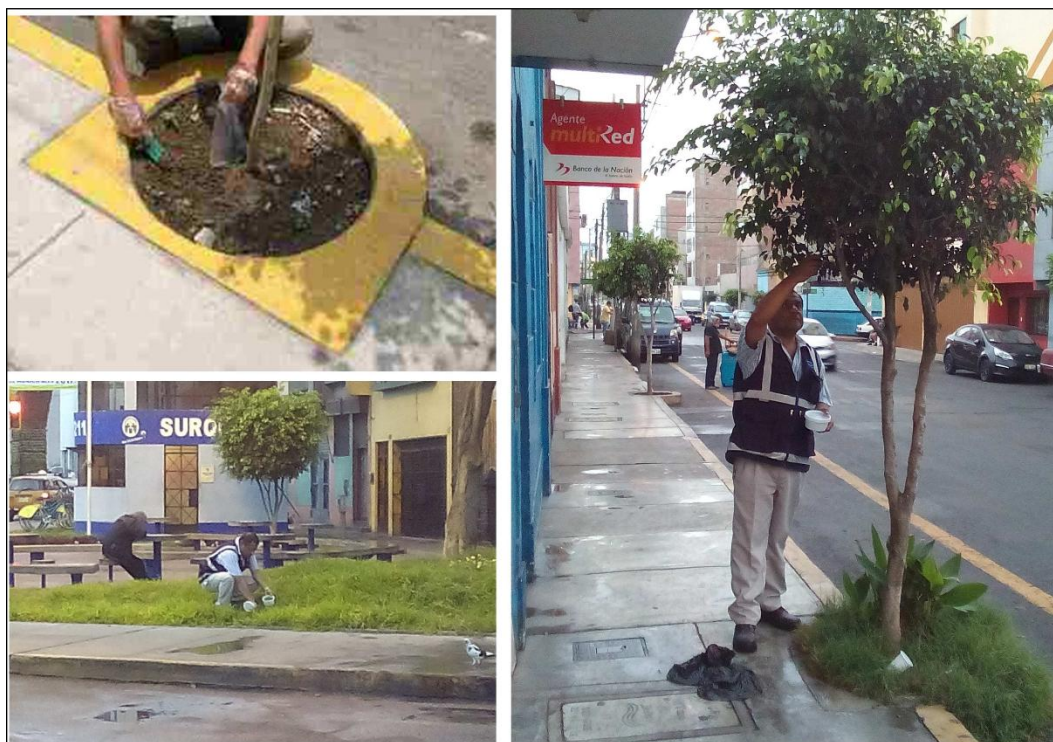


Figura 38. Muestreo ambiental en el área de influencia de la instalación

Considerando la velocidad de decaimiento del ^{18}F , el análisis se llevó a cabo con un sistema portátil de espectrometría gamma de centelleo sólido NaI(Tl) 3x3" asociado a un analizador multicanal marca Canberra modelo Inspector 2000 acoplado al sistema eléctrico de un automóvil (Figura 39).

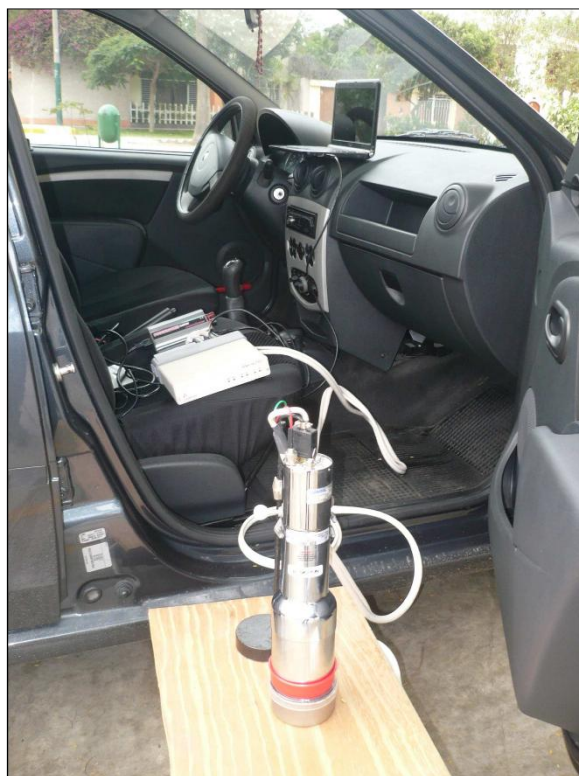


Figura 39. Sistema portátil de espectrometría gamma

El análisis de las muestras se llevó a cabo según la Norma ASTM D7784-12 *“Standard Practice for the Rapid Assessment of Gamma-ray Emitting radionuclides in Environmental Media by Gamma Spectrometry”*.

Con la finalidad de descartar la presencia de radionúclidos que se puedan encontrar por debajo del límite de detección del sistema de espectrometría gammay que tengan un periodo de decaimiento mayor, las muestras colectadas fueron acondicionadas y sometidas al análisis beta global en un sistema de radiometría marca Tennelec, modelo LB4110 (Figura 40).



Figura 40. Sistema de radiometría beta

En todos los ensayos no se encontró evidencia de la presencia de ^{18}F ni otros radionúclidos de interés radiosanitario.

El análisis de radiactividad beta total presentó valores bajos en las muestras de suelo y vegetación (Tabla 2), sin embargo, estos valores se deberían principalmente a la presencia a la presencia de ^{40}K . No se evidencia una alta subida de estos valores entre las primeras muestras con las últimas por lo que no hay variación debido a las actividades de la instalación.

Tabla 2. Radiactividad en muestras ambientales

Muestra	Beta total	¹⁸F	Otros	Unidades
Aire	ND	ND	ND	Bq/m ³
Agua	ND	ND	ND	Bq/L
Suelo 1	1.85	ND	ND	Bq/g
Suelo 2	1.54	ND	ND	Bq/g
Suelo 3	1.97	ND	ND	Bq/g
Vegetación 1	1.15	ND	ND	Bq/g
Vegetación 2	1.14	ND	ND	Bq/g

ND = No detectado

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN INTEGRAL DEL IMPACTO RADIOLÓGICO AMBIENTAL

El uso de ciclotrones en el Perú, destinados principalmente a la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas, trae consigo beneficios significativos en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, pero también plantea interrogantes en torno a sus posibles efectos sobre el medio ambiente. La radiación liberada, directa o indirectamente, puede interactuar con el aire, el agua, el suelo y los ecosistemas, generando un impacto que, aunque muchas veces imperceptible en el corto plazo, resulta fundamental evaluar desde una perspectiva preventiva y de gestión de riesgos.

En este capítulo se analizan los distintos escenarios de exposición ambiental derivados de la operación de ciclotrones, considerando tanto las emisiones rutinarias dentro de los márgenes de seguridad como los posibles eventos no planificados que podrían incrementar los niveles de radiación en el entorno. Se estudian los mecanismos de dispersión de radionúclidos en los compartimentos ambientales, su movilidad y persistencia, así como la forma en que estos pueden acumularse y transferirse a la cadena alimentaria, afectando indirectamente a la salud humana y a la biodiversidad. Asimismo, se incorporan indicadores cuantitativos y cualitativos que permiten dimensionar la magnitud del impacto, contrastando los niveles de radiación detectados con los límites establecidos por organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). La interpretación de estos datos no solo busca determinar el grado de riesgo, sino también orientar la toma de decisiones en materia de regulación, seguridad ambiental y políticas públicas.

De esta manera, la evaluación del impacto radiológico ambiental se convierte en un proceso clave para garantizar que el desarrollo científico y tecnológico vinculado a los

ciclotrones se mantenga en equilibrio con la protección del entorno y el bienestar de la sociedad. Este capítulo, por tanto, constituye un puente entre la caracterización técnica realizada en los apartados anteriores y las estrategias de mitigación y gestión que se discutirán en secciones posteriores, resaltando la importancia de una visión integral y responsable del uso de la energía nuclear en el país.

Evaluación de impacto en los trabajadores ocupacionalmente expuestos

Los registros de dosimetría personal presentados por la empresa muestran que ninguno de sus trabajadores superó en los últimos años los límites de dosis permisibles. En base a los resultados de la monitorización del equivalente de dosis ambiental $H^*(10)$ en el interior de la instalación, y asumiendo de manera conservativa la operación del ciclotrón durante dos horas, con una frecuencia de tres veces a la semana en un periodo anual de 52 semanas, se tiene un tiempo de exposición de 312 horas anuales y por lo tanto, asumiendo una permanencia completa de los trabajadores en este recinto, la dosis estimada para el personal de seguridad ubicado en el punto de control de ingreso (público) será de 0,14 mSv por año y para el personal ocupacionalmente expuesto ubicado en la zona de máxima exposición, será de 0,26 mSv por año (Tabla 2).

Tabla 2. Dosis anual estimada en la instalación

Tasa de dosis	Dosis anual estimada	
$\square$ Sv/h	$\square$ Sv/año	mSv/año
0,44	137,28	0,14
0,48	149,76	0,15
0,52	162,24	0,16
0,56	174,72	0,17
0,60	187,20	0,19
0,64	199,68	0,20
0,68	212,16	0,21
0,72	224,64	0,22
0,76	237,12	0,24
0,80	249,60	0,25
0,84	262,08	0,26

Tomando en consideración el Anexo I del Reglamento de Seguridad Radiológica donde se establece una dosis efectiva anual de 1,00 mSv para miembros del público y 20,00 mSv para trabajadores expuestos ocupacionalmente, se puede observar que el personal de la empresa recibiría aproximadamente la décima parte de estos niveles en el transcurso de un año.

Evaluación de impacto en miembros del público

En base a los resultados de la monitorización del equivalente de dosis ambiental $H^*(10)$ en los exteriores de la instalación, y estimando la dosis que recibiría una persona del público permaneciendo en el área de influencia durante 365 días, se tiene una dosis por exposición externa promedio de 0,62 mSv por año, valor inferior al total de la dosis efectiva mundial estimada en 2,4 mSv por año.

Lecturas de equivalente de dosis ambiental, realizadas en el año 2010 con un monitor de contaminación marca ESM durante la etapa en donde no funcionaba el ciclotrón, dieron como resultado un valor promedio de $0,105 \pm 12,2\%$ $\mu\text{Sv/h}$ en el interior de la instalación y $0,080 \pm 19,1\%$ $\mu\text{Sv/h}$ en los exteriores. En el año 2017, con un monitor PRD (Figura 34) las lecturas dieron como resultado un valor promedio de $0,081 \pm 8,2\%$ $\mu\text{Sv/h}$ en el interior y $0,071 \pm 5,0\%$ $\mu\text{Sv/h}$ en exteriores.

En todos los casos, las dosis efectivas anuales que se registraron no superan los límites establecidos por el Reglamento de Seguridad Radiológica y se encuentran por debajo de la dosis promedio mundial (Tabla 3).

Tabla 3. Equivalente de dosis ambiental $H^*(10)$ con el ciclotrón apagado

Año	Interior		Exterior	
	$\mu\text{Sv/h}$	mSv/año	$\mu\text{Sv/h}$	mSv/año
2010	0,105	0,920	0,083	0,727
2017	0,081	0,710	0,071	0,622
Variación anual	22,9%		14,5%	

Las variaciones observadas en los resultados se encuentran dentro de un rango aceptable y se explican por la contribución de incertidumbres debido al tipo de equipamiento y el proceso estocástico de la radiación de fondo.

Evaluación de impacto en componentes ambientales

Los resultados analíticos de la monitorización ambiental no presentaron evidencias de la presencia de ^{18}F ni ningún otro radionúclido de importancia radiosanitaria.

Los valores de actividad beta total encontrados en las muestras de suelo colectadas antes y después del proceso de producción y síntesis no presentan variación significativa y se debería considerar a la presencia de ^{40}K u otros radionúclidos naturales en este tipo de muestras.

Las Normas Básicas Internacionales de Seguridad GSR N°3 publicadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica establecen como concentraciones de actividad exentas para ^{18}F y ^{40}K el valor de 100 Bq/g; concentraciones por debajo de estos valores indican que el riesgo radiológico derivado del material es tan bajo que no precisa control reglamentario.

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que no existe impacto radiológico ambiental debido a los procesos de producción y síntesis por parte de la instalación.

Modelo de dispersión de descargas radiactivas en el área crítica

Considerando la necesidad de establecer un modelo de dispersión atmosférica para la instalación en situaciones de accidentes radiológicos que involucren una liberación masiva de material radiactivo al ambiente, se propone la aplicación de un modelo básico gaussiano de fuente puntual continua, suponiendo como hipótesis de partida que las concentraciones de contaminantes en cualquier punto considerado viento abajo están estabilizadas y no dependen del tiempo.

Este modelo describe el comportamiento del material radiactivo con fuerza ascensional neutra, dispersado en la dirección del viento y arrastrado a la misma velocidad. El fundamento del modelo de Pasquill-Gifford seleccionado consiste en una dispersión gaussiana en los ejes horizontal y vertical. Este modelo es adecuado hasta para la distancia que limita el área de influencia y es aplicable para cortos periodos de tiempo como es el caso del tiempo promedio normalizado del proceso que es de 22 segundos aproximadamente.

La fórmula normalizada para la dispersión de una fuente puntual elevada es la siguiente:

$$C = \frac{G}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

Donde,

C : Concentración en el punto x,y,z

$(Bq/m^3)G$: Intensidad de la emisión (Bq/s)

H : Altura de la fuente emisora sobre el nivel del suelo más la elevación del penacho.

Σ_y, σ_s : Coeficientes de

dispersión u : Velocidad

del viento (m/s)

Los resultados experimentales, tomando en consideración cuatro horas de proceso, la velocidad y dirección del viento durante el periodo de monitorización, con una descarga de ^{18}F promedio de 25097 Bq/s muestran que la dispersión del radionúclido se dirige en dirección Norte y Nor-Este presentando las mayores concentraciones a 50 metros de la chimenea con un valor máximo estimado de 29 Bq/m³ (Figura 41).

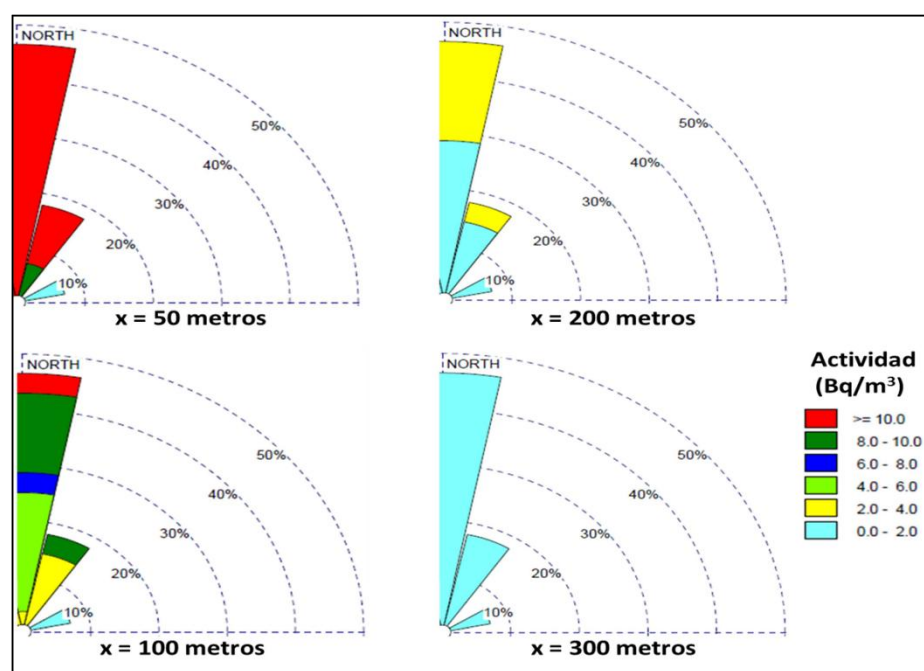


Figura 41. Frecuencia experimental de descargas de ^{18}F al ambiente

En base a los resultados experimentales, se puede apreciar que las descargas de material radiactivo ocurren solo en el 30% del área crítica establecida y la mayor concentración será depositada sobre los muros de los edificios cercanos que se encuentran ubicados en dirección Norte respecto a la instalación, por otro lado, debido a los procesos de dispersión atmosférica, los niveles de radiactividad disminuirán considerablemente a medida que se incremente la distancia, en este sentido, a partir de los 300 metros las estimaciones a través del modelo gaussiano da como resultados valores de concentración igual a 0,00 Bq/m³.

Sin embargo, considerando las variabilidades atmosféricas, se realizó un modelaje ambiental de descargas radiactivas a un metro de altura en todos los puntos del área crítica establecida, considerando el tiempo que dura el proceso de producción y síntesis, una velocidad de viento promedio de 1,7 m/s y una descarga promedio de 25097 Bq/s. Las estimaciones del modelo hasta para una distancia de 500 metros con respecto a la instalación muestran que a partir de los 100 metros de distancia las concentraciones de actividad son extremadamente bajas (Figura 42).

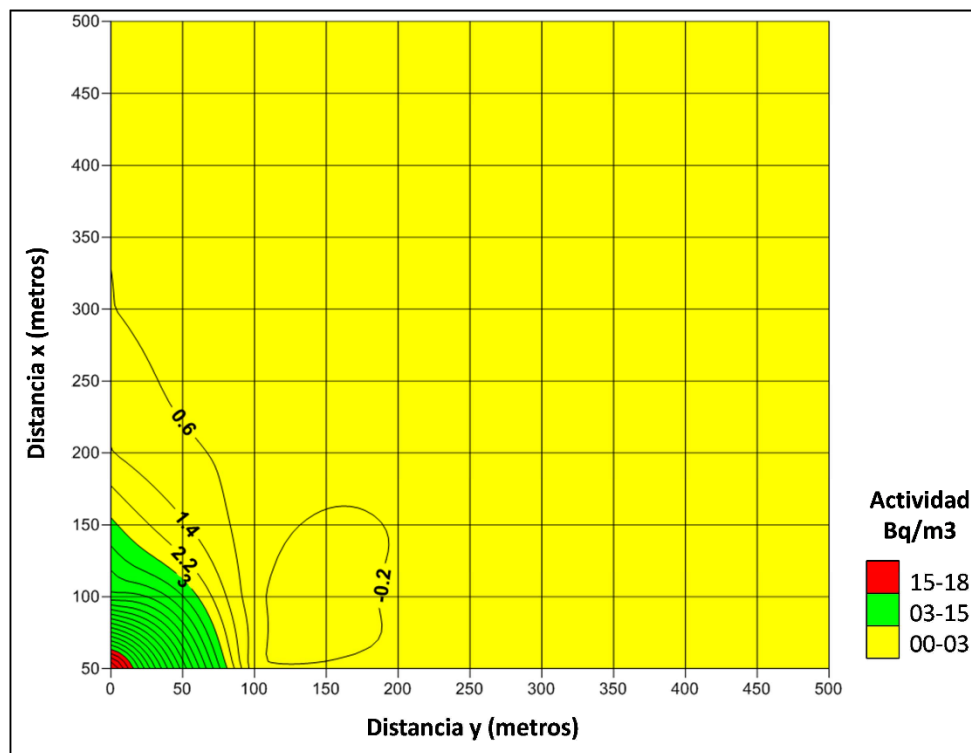


Figura 42. Modelo de dispersión de ^{18}F en el área crítica de influencia (0-500 metros)

Al realizar el ajuste del modelo para una distancia de hasta 100 metros con respecto a la fuente, se aprecia que los valores de concentración de actividad son extremadamente bajos y por lo tanto, según el Organismo Internacional de Energía Atómica, se encuentran por debajo de los límites de exención y por lo tanto el riesgo radiológico es tan bajo que no precisa control reglamentario.

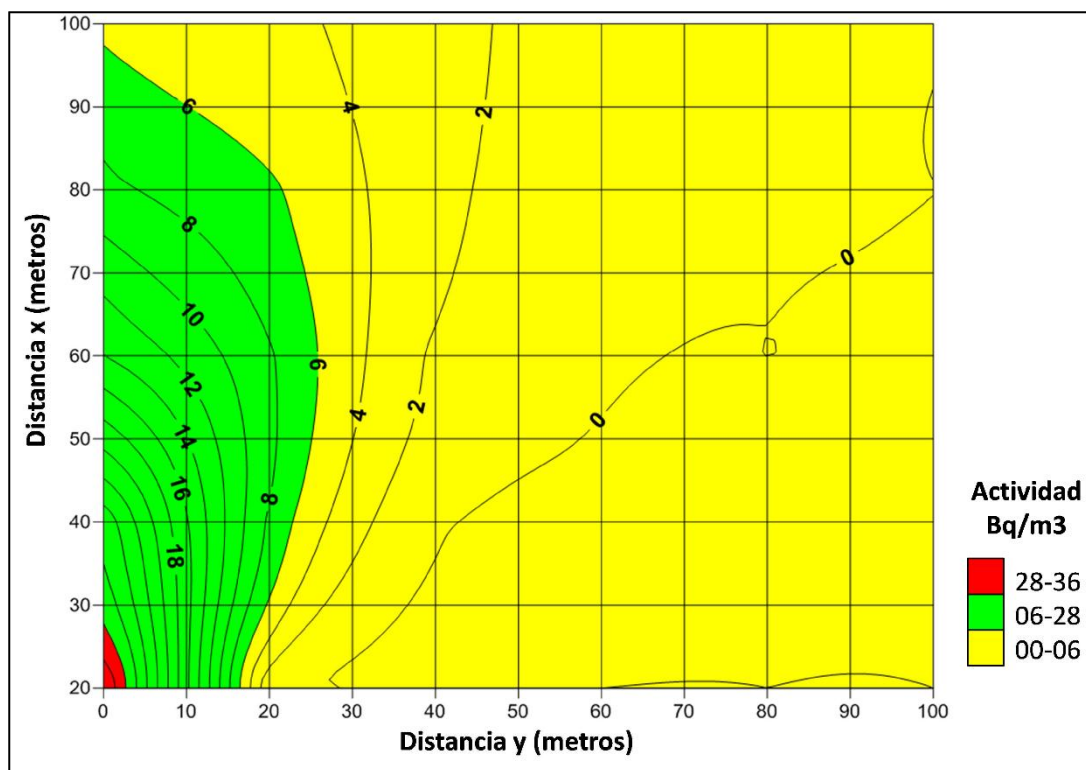


Figura 42. Modelo de dispersión de ^{18}F en el área crítica de influencia (0-100 metros)

Asumiendo una persona ubicada a 10 metros de la instalación, el modelo predice para el ^{18}F una concentración máxima de 18 Bq/m³ durante el tiempo de liberación puntual de la chimenea (22 segundos), por lo tanto, como la tasa de respiración pulmonar es de 0,006 m³/minuto, la incorporación en pulmones será de 0,1 Bq totales por cada proceso.

Estimando de manera conservativa que la misma persona estuviera ubicada en el mismo lugar durante tres procesos semanales en un periodo de 52 semanas, la actividad incorporada anual será de 15,6 Bequerelios por año y la dosis efectiva comprometida debido a la inhalación de este radionúclido será $4.37\text{E}-07$ mSv/año.

Durante las fechas en que se realizó el estudio, y dado el horario en que se realizan

los procesos de producción y síntesis, no se evidenció una presencia masiva de personas en un rango de 10 metros respecto a la chimenea de la instalación.

Sin embargo, este estudio, realizado en el mes de marzo y debido a los problemas generados por el Fenómeno del Niño Costero que retrasaron el inicio de la época escolar, no permitió evaluar el tránsito de menores de edad que a partir de las 7:00 horas se desplazan a su centro educativo.

Por lo tanto, los cálculos para establecer la dosis efectiva comprometida por unidad de incorporación por inhalación para miembros del público deben incluir grupos poblacionales que considere a menores de 7 años en adelante (Tabla 4).

Tabla 4. Dosis efectiva comprometida por unidad de incorporación (Sv/Bq) por inhalación

Nucleido	Periodo de semidesintegración	Tipo	7-12 años	12-17 años	> 17 años
18F	1,83 h	F	5,6E-11	3,4E-11	2,8E-11
		M	9,7E-11	6,9E-11	5,6E-11
		S	1,0E-10	7,3E-11	5,9E-11

En la tabla 5 se muestra el impacto radiológico en el público, expresado en dosis efectiva comprometida por proceso y en la tabla 6 se muestra la dosis efectiva comprometida anual debido a los procesos normales de producción y síntesis de la empresa Ciclotrón Perú.

Se puede observar que en todos los casos la dosis acumulada anual se encuentra en el orden de 1,00E-07 mSv/año, valor muy por debajo del límite establecido por el Reglamento de Seguridad Radiológica donde se establece una dosis efectiva anual de 1,00E+00 mSv para miembros del público.

Tabla 5. Estimación del impacto dosimétrico por proceso en el público debido a los procesos de producción y síntesis

Distancia (m)	Actividad ^{18}F (Bq/m ³)	Dosis efectiva comprometida (mSv/proceso)			
		Tipo	7-12 años	12-17 años	> 17 años
10	18	F	6.05E-09	3.67E-09	3.02E-09
		M	1.05E-08	7.45E-09	6.05E-09
		S	1.08E-08	7.88E-09	6.37E-09
20	9	F	3.02E-09	1.84E-09	1.51E-09
		M	5.24E-09	3.73E-09	3.02E-09
		S	5.40E-09	3.94E-09	3.19E-09
30	4	F	1.34E-09	8.16E-10	6.72E-10
		M	2.33E-09	1.66E-09	1.34E-09
		S	2.40E-09	1.75E-09	1.42E-09
40	2	F	6.72E-10	4.08E-10	3.36E-10
		M	1.16E-09	8.28E-10	6.72E-10
		S	1.20E-09	8.76E-10	7.08E-10

Tabla 6. Estimación del impacto dosimétrico anual en el público debido a los procesos de producción y síntesis

Distancia (m)	Actividad ^{18}F (Bq/año)	Dosis efectiva comprometida (mSv/año)			
		Tipo	7-12 años	12-17 años	> 17 años
10	2808	F	9.43E-07	5.73E-07	4.72E-07
		M	1.63E-06	1.16E-06	9.43E-07
		S	1.68E-06	1.23E-06	9.94E-07
20	1404	F	4.72E-07	2.86E-07	2.36E-07
		M	8.17E-07	5.81E-07	4.72E-07
		S	8.42E-07	6.15E-07	4.97E-07
30	624	F	2.10E-07	1.27E-07	1.05E-07
		M	3.63E-07	2.58E-07	2.10E-07
		S	3.74E-07	2.73E-07	2.21E-07
40	312	F	1.05E-07	6.36E-08	5.24E-08
		M	1.82E-07	1.29E-07	1.05E-07
		S	1.87E-07	1.37E-07	1.10E-07

Estimación de los límites de descarga

Concentración derivada en aire

La Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos de América (U.S.NRC) establece como concentración derivada en aire (CDA) para ^{18}F un valor de $1,11\text{E}+06$ Bq/m³ ($3,00 \square \text{Ci/ml}$), este valor ha sido establecido para una dosis de 50 mSv/año en trabajadores ocupacionalmente expuestos.

En base a esta consideración y tomando como referencia el Reglamento Peruano de Seguridad Radiológica, en la tabla 7 se establecen los valores de concentración derivada en aire para los diferentes grupos de personas.

Tabla 7. Concentración derivada en aire para ^{18}F

Normas Regulatorias	U.S. NRC	Perú (D.S. 009-97-EM)	
Grupo poblacional	Trabajadores	Trabajadores	Público
Límite anual de dosis (mSv)	50	20	1
Concentración derivada en aire (Bq/m ³)	$1,11\text{E}+06$	$4,44\text{E}+05$	$2,22\text{E}+04$

Límite anual de incorporación

En la tabla 8 se muestra el límite anual de incorporación por inhalación para trabajadores y público estimado en base a las recomendaciones de la U.S. NRC.

Tabla 8. Límite anual de incorporación por inhalación para ^{18}F

Normas Regulatorias		U.S. NRC	Perú (D.S. 009-97-EM)	
Grupo poblacional		Trabajadores	Trabajadores	Público
Límite anual de dosis (mSv)		50	20	1
Límite anual de incorporación por inhalación (Bq)	D	2.59E+09	1.04E+09	5.18E+07
	W	3.33E+09	1.33E+09	6.66E+07
	Y	2.96E+09	1.18E+09	5.92E+07

Tomando en consideración los factores dosimétricos de la tabla 4, se han estimado los límites anuales de incorporación para el 18F según el grupo ocupacional y por rangos de edad (Tabla 9). Se puede apreciar que los límites para el público están cercanos a los valores estimados de las recomendaciones de la U.S. NRC.

Tabla 9. Límites anuales de incorporación por inhalación para 18F según grupos de edad

Grupos Ocupacionales	Tipo	Límite Anual de Incorporación (Bq/año)		
		7-12 años	12-17 años	> 17 años
Público (1 mSv/año)	F	1.79E+07	2.94E+07	3.57E+07
	M	1.03E+07	1.45E+07	1.79E+07
	S	1.00E+07	1.37E+07	1.69E+07
Trabajadores(20 mSv/año)	F	3.57E+08	5.88E+08	7.14E+08
	M	2.06E+08	2.90E+08	3.57E+08
	S	2.00E+08	2.74E+08	3.39E+08

Límites de descarga

En base a los cálculos realizados en el entorno, para una intensidad de emisión de 18F igual a 25097 Bq/s, la concentración a 10 metros de la chimenea será de 18 Bq/m³ y una persona ubicada en dicho lugar durante el tiempo de la descarga (22 segundos) y a una tasa de respiración de 0,006 m³/minuto, va a incorporar 0,11 Bq.

Por lo tanto, para estimar el límite de descarga puntual, es decir una sola emisión será igual a:

$$LD = (ALI * G) \div (C * V)$$

Donde,

LD : Límite de descarga (Bq/s)

ALI : Límite anual de incorporación por inhalación (3,57E+07 Bq) G :

Intensidad de emisión (Bq/s)

C : Concentración del nucleido a 10 metros de la chimenea (18 Bq/m³) V :
Volumen de inhalación en el proceso (0,006 m³)

Por lo tanto, el LD que llegue a producir una dosis de 1,00 mSv en una persona adulta será igual a:

$$LD = (3,57E+07 \text{ Bq} * 25097 \text{ Bq/s}) \div (18 \text{ Bq/m}^3 * 0,006 \text{ m}^3) = 8,30E+12 \text{ Bq/s.}$$

En la tabla 10 se muestran los límites de descarga puntual, en situaciones de emergencia, expresada en Bq/s y Bq totales por proceso, asumiendo que la descarga por proceso dura 22 segundos. Estos valores de concentración van a generar una dosis por inhalación de 1,00 mSv en personas de diferentes edades ubicadas a 10 metros de la chimenea.

Tabla 10. Límites de descarga de 18F para un solo evento puntual en situación de emergencia radiológica

Tipo	Intensidad de emisión (Bq/s)			Bequerelios totales (Bq)		
	7-12 años	12-17 años	> 17 años	7-12 años	12-17 años	> 17 años
F	4.15E+12	6.83E+12	8.30E+12	9.13E+13	1.50E+14	1.83E+14
M	2.40E+12	3.37E+12	4.15E+12	5.27E+13	7.41E+13	9.13E+13
S	2.32E+12	3.18E+12	3.94E+12	5.11E+13	7.00E+13	8.67E+13

El Reglamento de Seguridad Radiológica (D.S. 09-97-EM) define como nivel de actuación a la “tasa de dosis o concentración de actividad por encima de las cuales deben adoptarse acciones reparadoras o protectoras en situaciones de exposición crónica o de emergencia”, al nivel de intervención como “el nivel de dosis evitable al alcanzarse el cual se realiza una acción protectora o reparadora específica en una situación de exposición crónica o de emergencia” y al nivel de registro como “el nivel de dosis, de exposición o de incorporación especificado por la Autoridad Nacional”.

La Universidad Autónoma de Barcelona recomienda, en su Manual de Protección Radiológica considera el nivel de intervención cuando la dosis mensual supere los 3/10 del límite anual de dosis, es decir, 0,3 mSv/mes.

Bajo esta consideración, en situaciones de exposición crónica, se han considerado de manera conservativa 12 procesos mensuales, a razón de 3 procesos por semana, por lo tanto, cada proceso no deberá exceder de una dosis de 0,025 mSv para una persona que se encuentre ubicada dentro del área crítica, a 10 metros de la chimenea durante todo el tiempo que dure la emisión del material radiactivo al ambiente.

En la Tabla 11 se muestran los límites de descarga de ^{18}F para situaciones de exposición crónica. Todos los valores son extremadamente superiores a la descarga promedio de la instalación durante su proceso, la cual es igual a $2,5\text{E}+04$ Bq/s ($5,5\text{E}+05$ Bq totales).

Tabla 11. Límites de descarga de ^{18}F por proceso de producción para situaciones de exposición crónica

Tipo	Intensidad de emisión (Bq/s)			Bequerelios totales (Bq)		
	7-12 años	12-17 años	> 17 años	7-12 años	12-17 años	> 17 años
F	1.04E+11	1.71E+11	2.07E+11	2.28E+12	3.76E+12	4.56E+12
M	5.99E+10	8.42E+10	1.04E+11	1.32E+12	1.85E+12	2.28E+12
S	5.81E+10	7.96E+10	9.85E+10	1.28E+12	1.75E+12	2.17E+12

Evaluación del impacto radiológico ambiental

La ley N° 27446 “Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental”, en su artículo 2°, incluye dentro de su ámbito de aplicación, los proyectos de inversión públicos y privados que impliquen actividades, construcciones u obras que puedan causar impactos ambientales negativos. Desde el punto de vista radiológico ambiental, el impacto negativo estará determinado por la dosis que recibe el público y los trabajadores ocupacionalmente expuestos, el nivel o grado de contaminación radiactiva que pueda afectar

la calidad de los recursos naturales como suelo, flora y fauna, así como la alteración o afectación de actividades socio- económicas del entorno.

Los criterios de protección ambiental que establece la ley en su artículo 5° y que son aplicables para las evaluaciones radiológicas son los siguientes:

- a) La protección de la salud de las personas.
- b) La protección de la calidad ambiental, tanto del aire, del agua, del suelo, como la incidencia que puedan producir los residuos sólidos, líquidos y emisiones gaseosas y radiactivas.
- c) La protección de los sistemas y estilos de vida de las comunidades.
- d) La protección de los espacios urbanos.

En base a los resultados obtenidos las conclusiones básicas debido al estudio de impacto ambiental son las siguientes:

- a) La protección de la salud de las personas: Los registros de dosimetría personal en trabajadores ocupacionalmente expuestos, los registros de monitorización de áreas y los valores del equivalente de dosis ambiental $H^*(10)$ en los exteriores del emplazamiento muestran que no hay detrimento debido a la exposición radiactiva en ninguno de los grupos ocupacionales.
- b) La protección de la calidad ambiental, tanto del aire, del agua, del suelo, como la incidencia que puedan producir los residuos sólidos, líquidos y emisiones gaseosas y radiactivas: Se ha verificado que la calidad radiológica ambiental del aire, agua y suelo no ha sido modificada ni se espera sea modificada por las actividades de la instalación. Las descargas radiactivas generadas por el sistema de ventilación del emplazamiento no llegan a representar riesgo para el medio ambiente, inclusive, la máxima capacidad

de producción del radiofármaco por parte de la instalación no llega a alcanzar los límites de descarga estimados para el área crítica de la zona.

- c) La protección de los sistemas y estilos de vida de las comunidades: Las observaciones realizadas en el área de influencia muestran que los estilos de vida y las actividades socioeconómicas que se llevan a cabo no son afectadas por los procesos de operación y síntesis del radiofármaco generado por la empresa.
- d) La protección de los espacios urbanos: No existe probabilidad de que los espacios urbanos ubicados en el área de influencia de la instalación sean afectados por las actividades desarrolladas por parte de la empresa.
- e) Por lo tanto, y en base a los resultados de la evaluación de los criterios ambientales especificados por la Ley N° 27446, la empresa Ciclotrón Perú S.A. no origina impactos ambientales de carácter significativo.

CONCLUSIONES

Todo proceso de investigación científica culmina en un espacio de síntesis que permite recoger los hallazgos más relevantes y reflexionar sobre su alcance. Las conclusiones constituyen, en ese sentido, el resultado lógico del análisis desarrollado a lo largo de los capítulos precedentes y representan no solo un cierre, sino también una apertura hacia nuevas perspectivas de investigación y acción.

En el caso del presente estudio sobre el impacto radiológico ambiental de los ciclotrones en el Perú, las conclusiones permiten integrar los aspectos técnicos, ambientales y sociales abordados, identificando las implicancias que el funcionamiento de estas instalaciones conlleva para la salud pública, la seguridad radiológica y la sostenibilidad del entorno. Este apartado no se limita a enunciar los resultados obtenidos, sino que busca interpretarlos a la luz de los estándares internacionales y de la normativa nacional, ofreciendo una visión crítica sobre los desafíos que persisten y las oportunidades de mejora en el ámbito de la gestión radiológica.

Asimismo, las conclusiones cumplen la función de orientar la toma de decisiones, aportando elementos útiles para el diseño de políticas públicas, el fortalecimiento de la regulación, la implementación de sistemas de monitoreo más robustos y la concientización de la sociedad sobre la importancia de un uso responsable de la tecnología nuclear. Al mismo tiempo, plantean posibles líneas de investigación futura que podrían ampliar y profundizar la comprensión del tema, contribuyendo a un desarrollo científico que esté siempre alineado con la protección ambiental y el bienestar colectivo.

De esta manera, este capítulo de cierre no solo recoge el camino recorrido, sino que reafirma la necesidad de mantener una mirada integral, crítica y propositiva frente a los desafíos que implica la operación de ciclotrones en el país.

El estudio realizado sobre el impacto radiológico ambiental de los ciclotrones en el Perú ofrece una visión integral del desempeño de estas instalaciones y de las implicancias de su funcionamiento en términos de seguridad radiológica, protección ambiental y sostenibilidad tecnológica. A lo largo del análisis, se ha constatado que la operación de los ciclotrones se desarrolla dentro de parámetros seguros, y que las medidas de control implementadas resultan efectivas para salvaguardar tanto a los trabajadores expuestos como a la población circundante y al ecosistema.

En primer lugar, los **sistemas de contención, blindajes estructurales y barreras físicas** han demostrado cumplir satisfactoriamente con su finalidad de reducir las dosis ocupacionales a niveles prácticamente nulos. La evidencia recogida confirma que los trabajadores no presentan registros dosimétricos significativos, lo cual valida la eficacia de los protocolos de protección y la idoneidad de las infraestructuras de seguridad instaladas. Este hallazgo es de especial importancia, dado que en instalaciones de carácter nuclear y radiológico la protección del personal constituye un pilar esencial del cumplimiento normativo y ético. Además, refuerza el cumplimiento del principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), que orienta la práctica internacional en protección radiológica.

En segundo lugar, los resultados de la monitorización ambiental externa muestran que el *equivalente de dosis ambiental $H(10)^*$* en los alrededores de la instalación se mantiene en niveles equiparables al fondo natural, sin variaciones significativas respecto al último estudio efectuado en el año 2010. Este hecho demuestra que la operación de los ciclotrones no ha introducido incrementos en la radiación de fondo perceptibles para la población ni para el ecosistema. Tal estabilidad es un indicador robusto de sostenibilidad operativa y de que los procesos de producción de radioisótopos no comprometen la calidad ambiental del área de influencia.

Un tercer aspecto fundamental es la **ausencia de radionúclidos artificiales en las muestras ambientales** recolectadas dentro del área de influencia. Los análisis realizados indican que los valores encontrados corresponden exclusivamente a radionúclidos de origen

natural, cuyos niveles se sitúan dentro de los rangos internacionales promedio. Este hallazgo ratifica que las operaciones de la instalación no han generado liberaciones que puedan acumularse en el aire, el agua, el suelo o la biota, evitando así procesos de bioacumulación que podrían representar un riesgo a mediano o largo plazo para la salud pública y los ecosistemas.

En lo concerniente a las **descargas radiactivas asociadas a la producción de ^{18}F** , se determinó que la cantidad liberada durante el periodo de evaluación asciende a un promedio de $5,5\text{E}+05$ Bq por proceso productivo. Este valor es notoriamente inferior a la cantidad exenta establecida por el Reglamento de Seguridad Radiológica (D.S. N° 009-97-EM), lo que significa que no se requiere un control regulatorio adicional, en concordancia con las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, GSR Parte 3). En consecuencia, el riesgo radiológico derivado de estas emisiones es considerado despreciable, reforzando la idea de que el impacto ambiental asociado a los ciclotrones en el Perú es mínimo y controlado.

Complementariamente, los resultados obtenidos a través del **modelo de dispersión gaussiano aplicado a las descargas de ^{18}F** muestran que la dosis acumulada anual en el punto más comprometido alcanza un valor del orden de $1,00\text{E}-07$ mSv/año. Dicho valor se encuentra siete órdenes de magnitud por debajo del límite establecido por la normativa nacional para la exposición del público (1 mSv/año). Este resultado no solo evidencia la insignificancia de la exposición, sino que además proporciona un respaldo científico sólido a la capacidad predictiva de los modelos de dispersión, constituyéndose en una herramienta confiable para la toma de decisiones en materia de gestión radiológica.

En lo referente a la evaluación normativa, conforme al **artículo 4° de la Ley N° 27446 – Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental**, la instalación se clasifica como **Categoría I**, debido a que no genera impactos ambientales de carácter significativo. Esta categorización refleja que los riesgos radiológicos asociados al funcionamiento de los ciclotrones se encuentran debidamente controlados y que la

instalación puede operar sin necesidad de someterse a un Estudio de Impacto Ambiental detallado, lo que representa un reconocimiento de su bajo nivel de afectación sobre el entorno.

En síntesis, los hallazgos de este estudio permiten extraer varias conclusiones de fondo:

1. **Seguridad radiológica ocupacional garantizada:** la infraestructura y los procedimientos cumplen con estándares internacionales, minimizando la exposición de los trabajadores a niveles insignificantes.
2. **Estabilidad ambiental comprobada:** la radiación en los alrededores se mantiene en los niveles de fondo natural, sin alteraciones atribuibles al funcionamiento de los ciclotrones.
3. **Ausencia de contaminación artificial:** no se han detectado radionúclidos de origen antropogénico en el ambiente, lo cual confirma la inocuidad de las operaciones.
4. **Descargas radiactivas dentro de límites exentos:** la liberación de ^{18}F está muy por debajo de los umbrales reglamentarios, con riesgo prácticamente nulo para el público y el medio ambiente.
5. **Modelización confiable del impacto:** los cálculos predictivos demuestran que las dosis potenciales al público son insignificantes y se encuentran ampliamente por debajo de los límites normativos.
6. **Clasificación ambiental favorable:** la instalación corresponde a la Categoría I, reafirmando que no produce impactos significativos y que su operación es ambientalmente sostenible.

No obstante, estas conclusiones no deben entenderse como un punto de llegada

definitivo, sino como un fundamento sólido para proyectar acciones futuras. Se recomienda mantener y fortalecer los **sistemas de monitorización radiológica continua**, garantizar la capacitación permanente del personal, y promover auditorías periódicas independientes que refuercen la transparencia del proceso. Asimismo, es pertinente ampliar los estudios hacia escenarios de riesgo no rutinarios, incluyendo posibles fallas de operación, eventos externos o emergencias, de modo que se disponga de planes de contingencia aún más robustos.

En una perspectiva más amplia, este estudio contribuye a la consolidación de una **cultura de seguridad nuclear y radiológica en el Perú**, donde el uso de tecnologías de alta complejidad, como los ciclotrones, se articula con principios de responsabilidad social, sostenibilidad ambiental y respeto a la normativa internacional. El desafío para los próximos años radica en seguir demostrando que es posible conjugar el avance científico y tecnológico con la protección efectiva del entorno y de la salud de la población, asegurando que la energía nuclear aplicada a la medicina continúe siendo una herramienta de progreso sin comprometer el equilibrio ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PERU. (2003). Ley N° 28028 “*Ley de Regulación del Uso de Fuentes de Radiación Ionizante*”. Congreso de la República. Perú.
- [2] El Peruano. (2008). Reglamento de la Ley N° 28028 “*Ley de Regulación del Uso de Fuentes de Radiación Ionizante*”. Decreto Supremo N° 039-2008-EM. El Peruano. Normas Legales. Perú. p.: 376417 – 376461.
- [3] PERU. (1997) Reglamento de Seguridad Radiológica. Decreto Supremo N°009-97-EM. Perú. 27 p.
- [4] IAEA. (1989). International Atomic Energy Agency. Measurement of Radionuclides in Food and the Environmental. Technical Report Series N° 295. Vienna. 170 p.
- [5] MINAM. 2011. Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental y su Reglamento. Ministerio del Ambiente. Perú. 160 p.
- [6] CSN. (2010). Estimación de las dosis a la población por la exposición debida al funcionamiento de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible, y a la radiación natural. Colección Informes Técnicos 25.2010. Consejo de Seguridad Nuclear. España. 372 p.
- [7] FORO. (2013). Criterios para el licenciamiento y requisitos de inspección de instalaciones con ciclotrones para producción de radioisótopos utilizados en aplicaciones e investigaciones médicas. Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares. 64 p.
- [8] OIEA. (2016). Protección Radiológica y seguridad de las fuentes de radiación:

- Normas Básicas Internacionales de Seguridad. Requisitos de Seguridad Generales. Parte 3. Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena. 492 p.
- [9] MINSA. (2012). Estudio de Saturación. Lima Metropolitana y Callao 2012. Ministerio de Salud. Perú. 66p.
- [10] U.S. AEC. (1958). Pre-operational environmental survey of radioactivity in the vicinity of Indian point power plant. U.S. Atomic Energy Commission. Docket 50-3. USA. 31 p.
- [11] MINSA. (2015). Guía para la elaboración de estudios de Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente en Sitios Contaminados. Ministerio de Salud. Perú. 145 p.
- [12] Jacobson, O.; Kiesewetter, D.O.; Chen, X. (2014). Fluorine-18 Radiochemistry, Labeling Strategies and Synthetic Routes. Bioconjugate Chem. 2015, 26, 1–18.
- [13] Ingeominas. (2002). Curso de Protección Radiológica para el Manejo de Material Radiactivo. Proyecto Estrategia Nacional para la Prevención, Atención y Monitoreo de Riesgos Radiológicos. Ministerio de Energía y Minas. Colombia. 162 p.
- [14] UAB. (2016). Manual de Protección Radiológica. Unidad Técnica de Protección Radiológica. Universidad Autónoma de Barcelona. España. 45 p.
- [15] Cotan-Pinto, S. (2007). Valoración de impactos ambientales. Inerco. España. 22 p.
- [16] URN. (2013). Evaluación de Impacto Ambiental. Método de Leopold. Universidad Nacional Río Negro. Argentina. 4 p.

- [17] Universidad de Oviedo. (1998). Parámetros de dispersión atmosférica. Universidad de Oviedo. España. 3 p.
- [18] Turmo, E.; Cuscó, J. (1999). Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales continuas. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España. 7 p.
- [19] OBNASEC. (2017). Ficha informativa sobre seguridad ciudadana del Distrito de Surquillo. Observatorio Nacional de Seguridad Ciudadana. Ministerio del Interior. Perú. 5 p.
- [20] INEI. (2014). Estado de la Población Peruana 2013. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Perú. 40 p.
- [21] ASTM. (2013). Standard Practice for the Rapid Assessment of Gamma-ray Emitting Radionuclides in Environmental Media by Gamma Spectrometry. ASTM-D7784-12. American Society for Testing Materials. USA. 7 p.
- [22] ARN. (2003). Factores dosimétricos para irradiación externa y contaminación interna, y niveles de intervención para alimentos. Guía AR 1 – Revisión 1. Autoridad Regulatoria Nuclear. Argentina. 155 p.
- [23] ARN. (2011). Licenciamiento y control de ciclotrones de pie de hospital. Autoridad Regulatoria Nuclear. Argentina. 73 p.
- [24] IAEA. (2010). Setting Authorized Limits for Radioactive Discharges: Practical Issues to Consider. IAEA-TECDOC-1638. International Atomic Energy Agency. Vienna. 82 p.
- [25] España. (2001). Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes. Real Decreto 783/2001. Ministerio de Empleo y Seguridad Social. España. 37 p.

- [26] CSN. (2010). Estudio y evaluación del impacto radiológico producido por las actividades de diversas industrias no nucleares del sur de España. Industrias de dióxido de titanio. Colección Informes Técnicos 26.2010. Consejo de Seguridad Nuclear. España. 71 p.
- [27] Tricio, V. (2008). Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la elaboración de planes de acción locales para mejorar la calidad del aire y estudios de impacto ambiental: estudio de caso. Noveno Congreso Nacional de Medio Ambiente. Fundación Conama. España. 31 p.
- [28] Arenas, G.M.; Calderón, G.J.; Noya, E.R. (2015). Actualización de sistemas de radioprotección en ciclotrón y radiofarmacia PET. Sociedad Argentina de Radioprotección. 9 p.
- [29] Facure, A.; Gasparian, P.B. R.; Di Prinzio, R.; Silveira, C.S.; Franca, W.F. (2015). Licenciamiento de Instalaciones con Ciclotrón en Brasil: Status y Perspectivas. Sociedad Argentina de Radioprotección. Argentina. 5 p.
- [30] CSN. (1993). Diseño y desarrollo del programa de Vigilancia radiológica Ambiental para centrales nucleares. Guía de Seguridad N° 4.1. Consejo de Seguridad Nuclear. España. 22 p.
- [31] Bonet Duraán, M.S.; Bozzo, R.H.; Larcher, A.M.; Menossi, C.A. (2001). Requerimientos regulatorios para la obtención de la licencia de operación de una instalación PET-Ciclotrón. Autoridad Regulatoria Nuclear. Argentina. 9 p.
- [32] Czerniczyniec, M.A.; Bonetto, J.P.; Giustina, D. (2015). Plan de monitoreo radiológico ambiental rutinario en las inmediaciones de las instalaciones nucleares y radiactivas del país. Autoridad Regulatoria Nuclear. Argentina. 9p.
- [33] CSNJ. (1988). Control y vigilancia radiológica de efluentes radiactivos

líquidos y gaseosos emitidos por centrales nucleares. Guía de Seguridad N°

1.4. Consejo de Seguridad Nuclear. España. 14 p.

- [34] NCHPS. (1999). Nuclide Safety Data Sheet: Fluorine-18. The North Carolina Chapter of the Health Physics Society. USA. 2 p.
- [35] Ramos, E.O.; Cornejo, N. (2002). Estudio de la estabilidad atmosférica y evaluación del impacto radiológico ambiental de la planta de tratamiento y almacenamiento de desechos radiactivos. Centro de Protección e Higiene de las radiaciones. Cuba. 5 p.
- [36] Osorio J.; Gonzáles, S.; Martínez, J.; López, E.; Jara, R.; Anaya, A. (2003). Impacto radiológico ambiental del centro nuclear Racso: Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental. Informe Científico Tecnológico 2002. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Perú. p: 205-206.