



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO
INGENIERÍA EN ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL
SEDE BELLAVISTA

**Modelado paramétrico de dispersión atmosférica aplicado a la
descarga al ambiente de flúor 18 en ciclotrones.**

Proyecto de título para optar al título de Ingeniero en
Energía y Sustentabilidad Ambiental

Profesor Guía: Patricio Fonseca

Alumno: Jorge Alonso Saavedra Duarte

Santiago, Julio del 2023

© Jorge Alonso Saavedra Duarte.

Se autoriza la reproducción parcial o total de este trabajo, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA

En Santiago, el 13 de septiembre del 2023, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Jorge Alonso Saavedra Duarte, de la carrera Ingeniería En Energía y Sustentabilidad ha aprobado el proyecto de título para optar al título de Ingeniero en Energía y Sustentabilidad Ambiental con una nota de 7.0_____.

Patricio Fonseca

Ariel Valdés

Agradecimientos

A mi madre, Marisol Duarte, por su apoyo incondicional durante mi vida, con tantas alegrías y pese a las dificultades.

A mi padre, Víctor Saavedra.

A mis abuelos, María Cristina, Isabel, Jorge y Patricio.

A mi pareja, Emilia Hernández.

Familia y amigos.

En memoria de mi abuelo, Guillermo Duarte.

Para ustedes mi dedicación y trabajo, gracias a cada uno.

RESUMEN

La tecnología nuclear es y será clave para el desarrollo de las sociedades del mundo, ya sea a nivel energético o con sus diversas aplicaciones médicas. Para estas últimas, la producción de radiofármacos destaca como un procedimiento habitual en la lucha contra el cáncer y en concreto en la etapa de detección. Para la obtención de radiofármacos se emplean radioisótopos que fungen como materias primas. En Chile, uno de los radiofármacos más utilizados es la Fluordesoxiglucosa, cuyo radioisótopo base es el flúor 18. Este se produce mediante un acelerador de partículas tipo ciclotrón en tres puntos distintos del país, siendo uno de ellos el CEN La Reina. En este contexto, la producción de flúor 18 en ciclotrones tiene desechos radioactivos del mismo flúor 18 a la atmosfera, generando la necesidad de realizar mediciones y modelos encargados de conocer las dosis radioactivas asociadas a la concentración del contaminante en la atmosfera, con el fin de resguardar la seguridad de las personas, respetando las dosis máximas permitidas en la norma chilena.

El objetivo principal de la investigación es determinar el modelo paramétrico más óptimo, aplicándole correcciones que permitan obtener un resultado representativo de las condiciones reales de operación normal del ciclotrón. Estas correcciones radican en el carácter de los parámetros de entrada y en consecuencia los valores de salida del modelo, ya que se corrigen aspectos de entrada de los modelos Gaussianos para obtener un dato de dosis efectiva comprometida por inhalación. Los resultados del estudio de 4 casos típicos concluyeron que el modelo obtenido es aplicable a los escenarios que busca modelar y que además las cifras obtenidas están dentro de los rangos permitidos en la norma y son los esperados por la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

Así mismo, se concluyó que el modelado paramétrico con correcciones pertinentes es representativo del comportamiento del flúor 18 en la atmosfera y es aplicable a otros escenarios y otros contaminantes, además esto permitió confirmar que las dosis asociadas a la emisión del ciclotrón de CEN La Reina están dentro de la norma exigida en Chile.

Palabras Clave: Modelo paramétrico, Dosis radiactiva, Dispersión de contaminantes, Modelo Gaussiano, Flúor 18 en ciclotrones.

ABSTRACT

Nuclear technology is and will be key to the development of world societies, either at the energy level or with its various medical applications. For the latter, the production of radiopharmaceuticals stands out as a common procedure in the fight against cancer and specifically in the detection stage. To obtain radiopharmaceuticals, radioisotopes are used as raw materials. In Chile, one of the most widely used radiopharmaceuticals is fluorideoxyglucose, whose base radioisotope is fluorine 18. This is produced by a cyclotron-type particle accelerator in three different parts of the country, one of them being the CEN La Reina. In this context, the production of fluorine 18 in cyclotrons has radioactive waste of the same fluorine 18 into the atmosphere, generating the need to carry out measurements and models in charge of knowing the radioactive doses associated with the concentration of the contaminant in the atmosphere, in order to protect the safety of people, respecting the maximum doses allowed in the Chilean standard.

The main objective of the investigation is to determine the most optimal parametric model, applying corrections that allow obtaining a representative result of the real normal operating conditions of the cyclotron. These corrections lie in the character of the input parameters and consequently the output values of the model, since input aspects of the Gaussian models are corrected to obtain data on the effective dose compromised by inhalation. The results of the study of 4 typical cases concluded that the model obtained is applicable to the scenarios that it seeks to model and that, in addition, the figures obtained are within the ranges allowed in the standard and are those expected by the Chilean Nuclear Energy Commission.

Likewise, it was concluded that the parametric modeling with pertinent corrections is representative of the behavior of fluorine 18 in the atmosphere and is applicable to other scenarios and other pollutants, in addition this allowed us to confirm that the doses associated with the emission of the CEN La Reina cyclotron are within the norm required in Chile.

Keywords: Parametric model, Radioactive dose, Contaminant dispersion, Gaussian model, fluor 18 in cyclotrons

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	9
1.1	INTRODUCCIÓN	9
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivo General	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
CAPÍTULO 2	MARCO TEÓRICO	12
2.1	CONTEXTO INTERNACIONAL	12
2.2	CICLOTRONES	15
2.2.1	Revisión histórica breve	15
2.2.2	Características técnicas y estructurales típicas para instalaciones de ciclotrón yaceleradores de partículas ³	16
2.2.3	Descripción de funcionamiento	18
2.2.4	Análisis físico del movimiento de la partícula	19
2.3	FLÚOR 18	20
2.3.1	Síntesis de Flúor 18	20
2.3.2	Aplicación médica: PET/CT	21
2.4	NORMATIVA DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA EN CHILE	22
2.4.1	Normativa relativa a la CCHEN	22
2.4.2	Normativa relativa a la seguridad nuclear	22
2.4.3	Reglamentos relativos a seguridad radiológica	23
2.5	RADIACIÓN IONIZANTE EN HUMANOS	27
2.5.1	Conceptos y definiciones generales	27
2.5.2	Fuentes de radiación ionizante	28
2.5.3	Exposición a la radiación ionizante	29
2.5.4	Efectos de las radiaciones ionizantes en la salud	29
2.6	DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA Y SEGURIDAD NUCLEAR	31
2.6.1	Aplicabilidad de modelos a descarga de material radioactivo	31
2.7	ESCALA DEL MODELO Y ESTRUCTURA DE LA ATMÓSFERA	32
2.7.1	Comportamiento Cinemático de efluentes liberados de una fuente puntual	33
2.7.2	Efectos de la temperatura en la dispersión	33
2.7.3	Sobre las capas de la atmósfera	34
2.7.4	Sobre la variabilidad día-noche	35
2.7.5	Efectos del viento en la dispersión	37
2.8	MODELADO PARAMÉTRICO	38
2.8.1	Modelo basado en la teoría estadística	39
2.8.2	Modelos basados en teoría de similitud	41
2.8.3	Modelo basado en el gradiente o teoría K	41
2.8.4	Modelos Empíricos o Semi-Empíricos	43
CAPÍTULO 3	METODOLOGÍA	44
3.1	MODELO GAUSSIANO PARA ESCALA LOCAL	44
3.1.1	Modelo Gaussiano en condiciones ideales	44
3.1.2	Modelo Gaussiano para un punto de emisión	46
3.1.3	Análisis de la concentración en puntos claves de la pluma	48
3.2	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE GAUSS OPTIMO	48
3.2.1	Condiciones de estabilidad y valores de los parámetros de dispersión	49
3.2.2	Efectos de la presencia de estructuras en los coeficientes de dispersión	49
3.3	CORRECCIÓN APLICADA PARA DOSIS EFECTIVA	50
3.3.1	Análisis Dimensional	50
3.3.2	Corrección de modelo de Gauss para dosis efectiva	52
3.3.3	Aplicación del modelo a la operación del ciclotrón de CEN La Reina	54
3.3.4	Área de estudio	55

3.3.5 Parámetros de entrada	56
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	59
CASO G1: FUNCIONARIO DE MANTENIMIENTO CRÍTICO	60
CASO G2: FUNCIONARIO DE MANTENIMIENTO NORMAL.....	63
CASO G3: FUNCIONARIO ADMINISTRATIVO ALA NORTE	65
CASO G4: PUBLICO EN VIVIENDAS CERCANAS	67
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN	70
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES.....	73
CAPÍTULO 6 REFERENCIAS Y ANEXOS.....	74
6.1 REFERENCIAS	74
6.2 ANEXOS.....	76

Índice de figuras

FIGURA 1 DIAGRAMA DESINTEGRACIÓN BETA + (RUDDY ALVAREZ, QUORA, UTESA 2019)	20
FIGURA 2 DESARROLLO DE UNA PLUMA A PARTIR DE UNA SECUENCIA DE PUFFS, START Y WENDELL (1974). WENDELL (1974)	33
FIGURA 3 ESTRUCTURA DE TEMPERATURA (IAEA TECDOC 379).....	36
FIGURA 4 ESPIRAL DE EKMAN (FLAP 152, ROBERTO GOMEZ)	37
FIGURA 5 VISUALIZACIÓN DE LOS PERFILES DE CONCENTRACIÓN A PARTIR DEL MODELO GAUSSIANO. AVANCES EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE ASADES Vol.13, 2009.	43
FIGURA 6 MODELO DE GAUSS.....	47
FIGURA 7 VARIABILIDAD POR ESTRUCTURAS (IAEA, TECDOC 379)	49
FIGURA 8 MODELO MATLAB DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE A LA QUE SE EXPONE EL G1 (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)	62
FIGURA 9 MODELO MATLAB DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE A LA QUE SE EXPONE EL GRUPO G2 (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)	64
FIGURA 10 MODELO MATLAB DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE A LA QUE SE EXPONE EL GRUPO G3 (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)	66
FIGURA 11 MODELO MATLAB DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE A LA QUE SE EXPONE EL GRUPO G3 (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)	69
FIGURA 12 MODELO MATLAB DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE EN EL RADIO DE CONTROL (ELABORACIÓN PROPIA, 2022).....	71
FIGURA 13 COMPENDIO DE FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS (IAEA, 1986)	76
FIGURA 14 COMPORTAMIENTO DE LA PLUMA EN RELACIÓN A OBSTÁCULOS (IAEA, 1986)	77
FIGURA 15 CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETRO SIGMA Y (IAEA, 1986)	78
FIGURA 16 CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETRO SIGMA Y (IAEA, 1986)	79

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1 DIAGRAMA DEL CICLOTRÓN DE LAWRENCE	15
ILUSTRACIÓN 2 PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, PRC (2019)	17
ILUSTRACIÓN 3 CICLOTRÓN CEN LA REINA, COMISIÓN CHILENA DE ENERGÍA NUCLEAR , PRODUCCIÓN FDG.....	18
ILUSTRACIÓN 4 MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA EN ACELERADOR (ÁNGEL FRANCO GARCÍA, CAMPO MAGNÉTICO 2016)	19
ILUSTRACIÓN 5 TOMOGRAFÍA PET/CT (NCI, 2020).....	21
ILUSTRACIÓN 6 RADIACIÓN EN HUMANOS, BBC MUNDO, MEDIO AMBIENTE 2011	29
ILUSTRACIÓN 7 VISTA AÉREA CEN LA REINA (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)	55
ILUSTRACIÓN 8 VISTA AÉREA CEN LA REINA (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)	56

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La tecnología nuclear ha sido clave para el desarrollo de las sociedades modernas, ya sea en investigación científica, generación energética o en sus aplicaciones médicas. En este último campo destaca la producción de radiofármacos a partir de isótopos radioactivos, utilizados en la detección de cáncer mediante los exámenes PET/CT (Positrón Emisión Tomography) / CT (Computarized Tomography). Este tipo de tratamientos son importantes en diversas etapas del cáncer, pero sobre todo en detección temprana. La producción se lleva a cabo en complejos aceleradores de partículas conocidos como ciclotrón, cuyo producto principal es el flúor 18, que a su vez es lo que le otorga propiedades radioactivas al fármaco que se emplea para la detección de cáncer. Es este mismo flúor 18 residual lo que se emite al ambiente y debe ser medido y mitigado para mantener la armonía en el ecosistema donde se ubique el reactor. La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), es un actor importante en la industria nacional de los radiofármacos, abasteciendo a 21 centros de salud con, dando tratamiento a casi 38.000 pacientes, además se encarga de fiscalizar y velar por el cumplimiento de las normas de seguridad radiológica dispuestas en la ley Chilena.

Estas normas entregan la pauta para el manejo del recurso nuclear en sus distintas áreas, sin embargo, para este estudio, destacan los valores de dosis máxima de radiación ; 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en 5 años), y de 50 mSv en un año cualquiera. Este valor de referencia debe ser respetado por los operadores de la industria nuclear, y por tanto será la referencia de este estudio.

Uno de los productos que se emplean para la realización de los exámenes PET/CT, es el flúor 18, que corresponde a un isótopo radioactivo del flúor normal, y como tal es una gran fuente de positrones, esta característica lo hace ideal para estos exámenes. En la industria radiofarmacéutica, el flúor 18 o (^{18}F) se fabrica utilizando un ciclotrón o acelerador de partículas lineales para bombardear un blanco, generalmente de (^{18}O) agua pura o enriquecida con protones de alta energía (18 MeV).

El isótopo] de flúor producido, se obtiene en forma de una solución acuosa de fluoruro 18. La molécula farmacéutica orgánica ^{18}O no se fabrica antes de la producción del productorradio farmacéutico, ya que los protones de alta energía destruyen dichas moléculas. Los radiofármacos que utilizan flúor deben sintetizarse después de que se haya producido el ^{18}F .

Además, como todo proceso productivo debe ser responsable con el medio ambiente y con las personas que puede afectar, más aún tratándose de materias radioactivas, que son potencialmente peligrosas y que causan tanto temor en la población. Es importante que exista un correcto manejo de los residuos de la producción, y para ello deben seguirse los lineamientos internacionales que describen el correcto tratamiento de este tipo de residuos.

Respecto a esto, un organismo importante es la IAEA (International Atomic Energy Agency), cuyos estatutos datan de 1956 y se basan en la cooperación internacional en el campo de la energía nuclear, en busca de un manejo seguro y pacífico de la tecnología nuclear. (IAEA, 1998-2022). Sin embargo, pese a que las referencias son internacionales, es labor de todos los centros que posean instalaciones nucleares, hacerse cargo de sus productos, teniendo en cuenta los parámetros geográficos y climatológicos de la zona, la legislación, entre otros.

El Departamento de Seguridad Nuclear y Radiológica de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (DISNR) tiene como objetivo aplicar las consideraciones internacionales en los centros nucleares de Chile. Esto implica garantizar el manejo responsable de los residuos radioactivos y cumplir con las normas de seguridad radiológica establecidas en la legislación chilena. El DISNR trabajará en colaboración con los centros de salud que utilizan radiofármacos, como los empleados en los exámenes PET/CT, los cuales se producen a partir del isótopo radioactivo flúor 18.

La producción de radiofármacos con flúor 18 se lleva a cabo en ciclotrones, que son complejos aceleradores de partículas. Sin embargo, es fundamental medir y mitigar la emisión de flúor 18 residual al ambiente para preservar la armonía del ecosistema circundante al reactor. En este sentido, la CCHEN desempeña un papel importante en la industria nacional de los radiofármacos, abasteciendo a 21 centros de salud y tratando a casi 38.000 pacientes.

Para garantizar la seguridad y protección radiológica, existen normas en Chile que establecen límites de dosis máxima de radiación. Estos límites, promediados durante cinco años consecutivos, son de 20 mSv anuales (100 mSv en 5 años) y de 50 mSv en cualquier año. Estos valores de referencia deben ser respetados por los operadores de la industria nuclear.

Es importante destacar que, en el proceso de producción de radiofármacos, se utilizan aceleradores de partículas para bombardear un blanco y obtener el flúor 18 en forma de una solución acuosa de fluoruro 18. La síntesis de los radiofármacos que utilizan flúor se realiza después de la producción del ^{18}F , ya que los protones de alta energía destruyen las moléculas farmacéuticas orgánicas ^{18}O .

Además, se debe tener en cuenta el manejo adecuado de los residuos de la producción de radiofármacos, siguiendo los lineamientos internacionales establecidos por la International Atomic Energy Agency (IAEA). Este organismo promueve la cooperación internacional para un manejo seguro y pacífico de la tecnología nuclear.

En conclusión, el estudio propuesto por el Departamento de Seguridad Nuclear y Radiológica de la Comisión Chilena de Energía Nuclear busca aplicar las consideraciones internacionales en los centros nucleares de Chile, garantizando el cumplimiento de las normas de seguridad radiológica y el manejo responsable de los residuos de la producción de radiofármacos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Generar un modelo estandarizado para la detección de dosis efectiva en humanos, asociada a una concentración radioactiva de flúor 18 en el espacio, emitida por ciclotrones ubicados en distintas zonas geográficas y en escala local en la atmósfera.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar alternativas existentes en la literatura, de modelos aplicables a descargas a la atmósfera de contaminantes.
- Determinar un modelo optimo y realizar correcciones relativas a la obtención de un valor final de dosis efectiva de flúor 18.
- Implementar modelo en escenario real: ciclotrón CEN La Reina con variables, características de esa instalación y zona de emplazamiento y contrastar los resultados obtenidos con los valores de referencia de dosis máxima permitida en la ley chilena.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Contexto internacional

La sostenibilidad en los procesos es el pilar fundamental para el desarrollo de las sociedades, para satisfacer las necesidades de todas las personas hoy, sin poner en riesgo al medioambiente y a las generaciones futuras. Todos los actores de la sociedad deben involucrarse en la sostenibilidad, sin embargo, las instituciones son particularmente importantes, pues tienen alto impacto en sus respectivas áreas.

La medición y manejo de los residuos industriales es parte de las acciones para el desarrollo sostenible de Chile, que se encuentra suscrito al acuerdo de París y, por tanto, debe buscar la mejora y optimización de diversas áreas socioambientales.

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales, fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

Los 17 ODS están integrados, ya que reconocen que la acción en un área afectara los resultados en otras áreas y que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental. Los países se han comprometido a priorizar el progreso de los más rezagados, es decir, países en desarrollo o en vías de desarrollo. La creatividad, el conocimiento, la tecnología y los recursos financieros de toda la sociedad son necesarios para alcanzar los ODS en todos los contextos. En este caso, se pueden implicar 6 objetivos de desarrollo sostenibles en el proceso de producción de radioisótopos;

- **Salud y bienestar (Objetivo 3):** Busca garantizar una vida sana y promover el bienestar para todas las personas. Este objetivo es esencial para el desarrollo sostenible y en este caso, se debe velar porque la salud de las personas no se vea afectada por las emisiones de residuos en la producción de radioisótopos, sobre todo aquellas comunidades que se encuentran cerca de reactores.
- **Industria, innovación e infraestructura (Objetivo 9):** La industrialización inclusiva y sostenible, junto con la innovación y la infraestructura, deben propiciar un crecimiento económico dinámico y competitivo, para así generar empleo e ingresos para la sociedad. Además, se deben introducir y promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso eficiente de los recursos.
Aplicado a los procesos de producción de radiofármacos, se refiere a la búsqueda de constante de la optimización y seguridad en la operación. Mediante el análisis teórico, las nuevas tecnologías, capacitación de personal, etc. La industrialización inclusiva y sostenible, junto con la innovación y la infraestructura, deben propiciar un crecimiento económico dinámico y competitivo, para así generar empleo e ingresos para la sociedad. Además, se deben introducir y promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso eficiente de los recursos.
- **Ciudades y comunidades sostenibles (Objetivo 11):** A nivel mundial, se observa una clara tendencia a la urbanización. Desde 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades, y se espera que dicha cantidad aumente hasta el 60% para 2030. Por esta razón, los ciclotrones utilizados para producir radiofármacos deben ubicarse relativamente cerca de los grandes centros asistenciales, para que sus productos

no pierdan las propiedades durante el transporte. Con esto en cuenta, los reactores deben coexistir con grandes asentamientos, por esto deben analizarse las emisiones y su afectación a las personas, y su viabilidad estructural dado los requerimientos en infraestructura.

- **Producción y consumo responsable (Objetivo 12):** El consumo y la producción mundiales son las fuerzas impulsoras de la economía y dependen del uso de los recursos de una manera sostenible y que conviva con el medio ambiente, es decir, con mínimos efectos destructivos sobre el planeta y sus habitantes.
- El progreso científico, económico y social conseguido durante el último siglo ha estado acompañado de una degradación medioambiental que está poniendo en peligro los mismos sistemas de los que depende nuestro desarrollo futuro. El desarrollo nuclear es parte de este fenómeno con ventajas y desventajas, por lo que es labor de las sociedades minimizar los efectos adversos sin perjudicar significativamente la producción, pues en este caso, los radiofármacos son un elemento esencial en el tratamiento contra el cáncer.
- **Acción por el clima (Objetivo 13):** Las emisiones producto de procesos radioactivos deben optimizarse para no aumentar el daño a la atmósfera, que ya ha enfrentado afectaciones producto de los gases de efecto invernadero, por lo que la industria radiológica debe, al igual que otras, alinear sus esfuerzos a reducir y optimizar emisiones.
- **Vida de ecosistemas terrestres (Objetivo 15):** Pese a que la liberación de contaminante es atmosférica, los sucesos de deposición y lluvia afectan por cierto a la vidaterrestre, ya que además de respirar, coexisten con la atmósfera, por lo que las concentraciones peligrosas de sustancias en la atmósfera afectan a los organismos y la biosfera terrestre.

Con esto en consideración, las iniciativas ambientales y de protección radiológicas en cuanto a emisión atmosférica de contaminante son esenciales como guía para todos los centros que trabajan con radioisótopos, sin embargo, es necesario adaptar esos lineamientos a los casos particulares, pues de esa forma se obtienen mediciones realmente representativas del grado de afectación que tienen las emisiones en las personas y en el entorno. He ahí el valor de este trabajo de tesis, que buscara contrastar los modelos matemáticos propuestos por la norma internacional con diferentes alternativas de modelado, para determinar la más óptima aplicable a la infraestructura en Chile. En concreto, este estudio se centra en los ciclotrones de producción de radiofármacos, y en la liberación de Flúor 18 residual al ambiente, analizando su comportamiento una vez este se encuentra en la atmósfera.

Los primeros documentos relacionados con dispersión atmosférica relacionada con elementos radioactivos datan de 1920 y 1923, con las investigaciones publicadas por Tylor y Roberts respectivamente, y supusieron pasos importantes en estudios teóricos y experimentales. Estos trabajos fueron motivados principalmente por fines militares, para prepararse ante escenarios de crisis nuclear en posibles enfrentamientos bélicos y se centraban en un amplio espectro de modelos matemáticos de dispersión atmosférica, estudios sobre el comportamiento del viento, las temperaturas, el espectro de turbulencias, además de instrumentación y técnicas de medición, y fenómenos de deposición, presuposición, y difusión.

Luego del periodo de guerra, los siguientes estudios relevantes dejaron de lado el análisis para gases densos y concentraciones fluctuantes aplicables a gases inflamables para centrarse en elementos de seguridad radiológica, sobre todo, desde el desastre de Chernobyl en 1986, que dio pie para profundizar en mecanismos de seguridad tanto en operación normal como en accidentes o eventos inusuales. Desde entonces, los esfuerzos se centraron en recopilar información y hacerla accesible para todos los operadores nucleares del mundo, para así evitar futuros accidentes. Para esto, se fundaron instituciones y organismos internacionales;

IAEA: International Atomic Energy Agency, opera desde 1956, es el centro mundial de cooperación en el campo nuclear y busca promover el uso seguro, protegido y pacífico de las tecnologías nucleares. Trabaja para los usos seguros, protegidos y pacíficos de la ciencia y la tecnología nucleares, contribuyendo a la paz y la seguridad internacionales y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

ICRP: International Commission on Radiological Protection, 1928, es una organización benéfica registrada independientemente, establecida para promover para el beneficio público y la ciencia de la protección radiológica, en particular brindando recomendaciones y orientación sobre todos los aspectos de la protección contra la radiación ionizante.

IRPA: International Radiation Protection Association, 1965: asociación internacional de profesionales en protección radiológica que se unen a través de sociedades nacionales o regionales. Busca cubrir todos los campos de la protección radiológica, incluidos la medicina, la energía nuclear y otros sectores industriales, regulación, asesoría gubernamental e investigación. El espectro de miembros va desde aquellos en países con una infraestructura de protección radiológica altamente evolucionada hasta países más pequeños que luchan por desarrollar niveles básicos de protección.

FORO: Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares es una asociación creada en el año 1997 con el objetivo de promover la seguridad radiológica, nuclear y física al más alto nivel en la región iberoamericana. Está integrado por los organismos reguladores radiológicos y nucleares de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, España, México, Paraguay, Perú y Uruguay, y tiene la intención de ir incorporando nuevos miembros a medida que se vaya logrando la consolidación de su estructura organizativa e institucional.

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica, entidad dependiente de la Organización de las Naciones Unidas, del que Chile es Estado Miembro conforme al decreto N° 544, de 1960, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

Estas son las principales instituciones relativas a la seguridad radiológica y desde su fundación se encargaron de publicar documentos al respecto, entre los que destacan IAEA Safety Series No.50-SG-5 1980, IAEA Safety Series No.57 1982, FORO 2015, Proceedings Proceedings of the Fifth International Symposium on the System of Radiological Protection, ICRP 2019, ICRP Publications, UK 2018 y por su puesto el TECDOC - 379 publicado por la IAEA en Viena en 1986, que es referencia para este trabajo de tesis.

Además, durante los últimos años se incorporaron plataformas digitales como; Accelerator Knowledge Portal, IAEA, 2006 y Cyclotron Database IAEA, 2006, ambos recopilan datos sobre aceleradores de partículas en el mundo.

2.2 Ciclotrones

2.2.1 Revisión histórica breve

El concepto de ciclotrón se presentó al mundo en California, Estados Unidos, en enero de 1932, por Ernest Orlando Lawrence¹ y lo hizo bajo la descripción de “Método y aparato para acelerar iones”. No fue sino hasta junio de 1939 que llevo a cabo la puesta en marcha del primer ciclotrón, luego de 7 años de arduo trabajo, Lawrence además consigue el premio Nobel de física por la invención del ciclotrón y sus aplicaciones. Finalmente, en 1962 primer ciclotrón se apagó definitivamente. Los primeros bocetos y modelos del ciclotrón fueron pensados en alambre y cera, y pese a lo rudimentario de sus materiales, el primer prototipo funciono soportando una corriente de 2.000V, luego de ciertas iteraciones, el ciclotrón fue capaz de energizar partículas hasta 1,2 MeV. Con estos resultados y para continuar con la investigación, Lawrence promovió la fundación Radiation Laboratory of Berkeley, que hoy lleva su nombre. Además, en los experimentos llevados a cabo en el ciclotrón se logró aislar por primera vez el Tecneicio, el primer elemento no presente en la naturaleza obtenido de forma artificial. La mayoría de los actuales aceleradores de partículas de alta energía descienden del primer ciclotrón de protones de 1 MeV construido por Ernest O. Lawrence. (Castell, 2020)

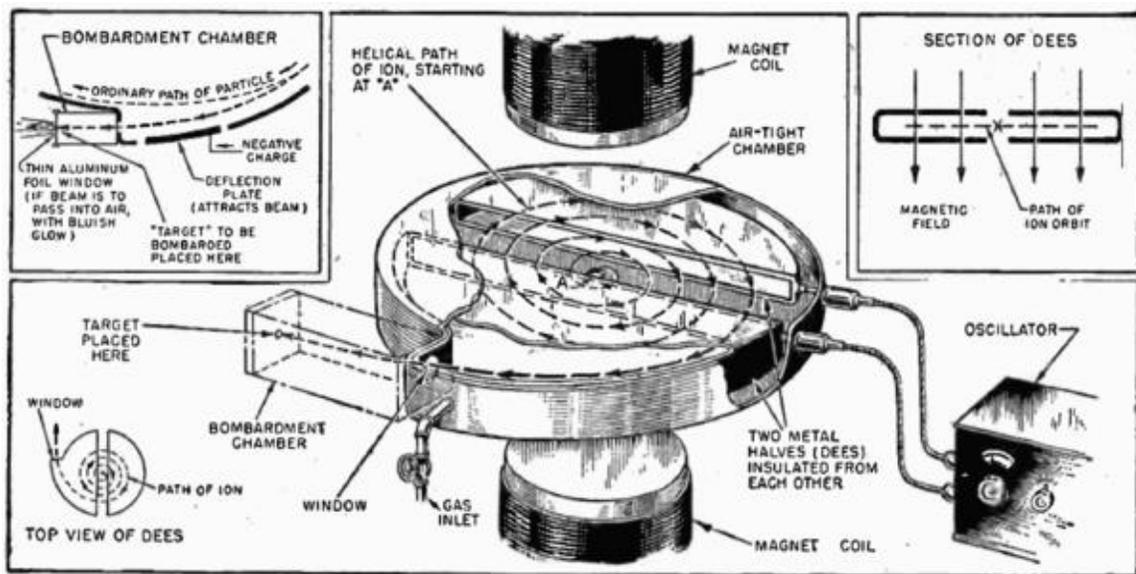


Ilustración 1 Diagrama del ciclotrón de Lawrence

En Chile, la CCHEN² recibió en 2002 el primer ciclotrón del país (Cyclone 18/18), y a este se le suma más tarde el que posee PositronPharma emplazado en Providencia, Santiago (Cyclone18), ambos manufacturados por IBA con una energía de protón de 18 MeV (Cyclotrone Database IAEA, 2006)

Las operaciones de ambas unidades están a cargo de la inspección de la DISNR, departamento de la CCHEN, que supervisa la seguridad nuclear y radiológica en Chile.

¹ Ernest Orlando Lawrence (Canton, Estados Unidos, 1901 - Palo Alto, id., 1958) Físico estadounidense, el primero en concebir un acelerador de partículas. En 1925 se doctora en física por la Universidad de Yale, donde fue profesor asistente de 1927 a 1928, fecha en que se trasladó a la Universidad de Berkeley, en la que ocupó una plaza de residente antes de ser nombrado profesor en 1930.

² CCHEN: Comisión Chilena De Energía Nuclear Ejerce su rol de institución pública, fomentando y desarrollando la investigación, el conocimiento y la provisión de productos y servicios, en el ámbito de la energía, las radiaciones ionizantes, tecnologías nucleares y afines; normar y fiscalizar su uso pacífico y seguro para la sociedad y el medioambiente.

2.2.2 Características técnicas y estructurales típicas para instalaciones de ciclotrón y aceleradores de partículas³.

El principio fundamental del funcionamiento del ciclotrón es la interacción de partículas cargadas (iones) con los campos eléctrico y magnético. La partícula $P+(q,m)$ ⁴ se aísla y posiciona entre dos placas paralelas, que a su vez son sometidas a una corriente eléctrica sinusoidal (A.C), que produce un campo eléctrico en la región diametral entre las placas, oscilando en dos semiciclos (+ - , -+). Además, las placas se alojan entre dos semicírculos (D's) que confinana la partícula mientras es acelerada, esto a través de un campo magnético generado perpendicularmente al plano de las placas, es decir los bordes diametrales de las D's deben estar adyacentes al campo uniforme y normal al plano de estas. Al ser un campo magnéticoperpendicular y uniforme, la partícula describe trayectorias radiales crecientes, proporcionales a la energía de la misma partícula, que resultan en un espiral de salida tangencial. Al interior de la cámara se genera vacío, el campo magnético que se produce suele estar entre los 1.5y

T, el voltaje utilizado es Corriente Alterna 380V trifásicos y el consumo de energía es de en torno a 70kVA, consiguiendo llevar a los iones a alta energía: mayor a 10MeV).

Edificación: Se recomienda que el ciclotrón se ubique en el piso más bajo del edificio, por su peso;

- Peso del ciclotrón 23 toneladas métricas en 4 pilares
- Diámetro del círculo del pilar 28 cm
- Superficie de apoyo del pilar 615.7 cm
- Carga x pilar 10 kg/cm

Suministro de agua: Se debe instalar un sistema secundario de refrigeración por agua como soporte al sistema primario del cambiador de calor del ciclotrón. Debe preverse una línea de suministro de agua.

Ventilación y refrigeración: La humedad relativa nivel no excederá 50 % en todas las áreas pertinentes. Debe asegurarse una presión negativa de 25 a 40 Pa en la salas de radioquímica y en el sarcófago del ciclotrón. El sistema de ventilación se diseñara conforme a los códigos locales y a las reglas de salud y de seguridad.

Sala Ciclotrón (sarcófago) :

- Límites de temperatura entre (17-28)°C
- Niveles de humedad El. % 35-50 baja condensación.
- Energía disipada al aire 3 KW

Sala de suministro de energía: -Límites de temperatura 17-28 o C

- Niveles de humedad El % 35-50 baja condensación.
- Energía disipada en el aire 14 KW

Sala de radioquímica:

³ Especificaciones y recomendaciones extraídas de FORO y del XIV Seminario de Ing. Biomédica 2004 Facultades de Medicina e Ingeniería - Univ. de la República Oriental del Uruguay, (Cardenas, et.al., 2015)

⁴ Partícula (q,m): Caracterización de una partícula puntual, de carga "q" y masa "m" definidas

- Límites de temperatura 10-30 o C
- Niveles de humedad El % 35-50 baja condensación
- Energía disipada en el aire 3 KW

Protección Radiológica: Se tienen que cumplir todos las leyes y reglas locales en relación con la seguridad y radioprotección. El edificio y toda el área de trabajo del ciclotrón deben cumplir con todas las normas pertinentes de seguridad y protección contra la radiación durante todas las fases de construcción, instalación, experimentación y operación. Deben instalarse estructuras blindadas y sus tuberías de conexión, requeridas para la operación de módulos de radioquímica.

-Detector gamma dentro y fuera del sarcófago respectivamente con monitorización de la tasa de radiación localizada en la sala de suministro de energía y alarmas visuales y sonoras en caso de sobrepasar el umbral de actividad.

-Control de acceso al sarcófago según el nivel de la tasa de la radiación.

-Vestimenta de seguridad: por ejemplo, guantes, polainas, entre otras.



Ilustración 2 Protección radiológica, PRC (2019)

2.2.3 Descripción de funcionamiento

En T_0 , el ciclotrón se encuentra preparado para empezar a acelerar al ion, el voltaje $V_0 = 0$ por lo que el campo eléctrico⁵ $E_0 = 0$ en la región diametral intermedia. El protón (q, m) se encuentra quieto entre las placas (que no poseen carga aún), es decir, su movimiento relativo es nulo: ($a=0 \leftrightarrow \Delta(x, y, z) = 0$).

Luego en el instante inmediatamente siguiente a T_0 , se lo conocerá como T_i y es la puesta en marcha del acelerador, esto significa que; $\Delta V_i = V$, generando carga en las placas que atraen y repelen en semiciclos inversos, es decir, luego de aplicado el voltaje, una placa toma carga positiva y repele al protón (+), mientras que la otra toma carga negativa atrayendo al protón. Esta exposición a los campos inversos provoca que el protón se mueva hacia la placa que posea carga inversa en ese semiciclo, comenzando una trayectoria espiral influida por el campo magnético uniforme y normal (perpendicular) al plano de la trayectoria de la partícula. Al completar el semiciclo y volver a la zona diametral entre las placas (vacío), cambia la polaridad de las placas en función del voltaje sinusoidal, completando el ciclo y volviendo a acelerar la partícula, pero esta vez de forma contraria al ciclo anterior, para que el protón siga su velocidad vectorial y acelere.

Teniendo en cuenta que el campo magnético es uniforme y constante, y que la aceleración de la partícula es una en función del tiempo⁶, llegará un instante T_f donde la partícula alcance la velocidad de escape, que por definición será mayor a la fuerza del campo magnético B . Cuando esto sucede, la partícula sigue una trayectoria tangencial a la espiral radial que describió previamente con una energía aproximada a los 18 MeV rumbo a un blanco. (AKP, 2022).

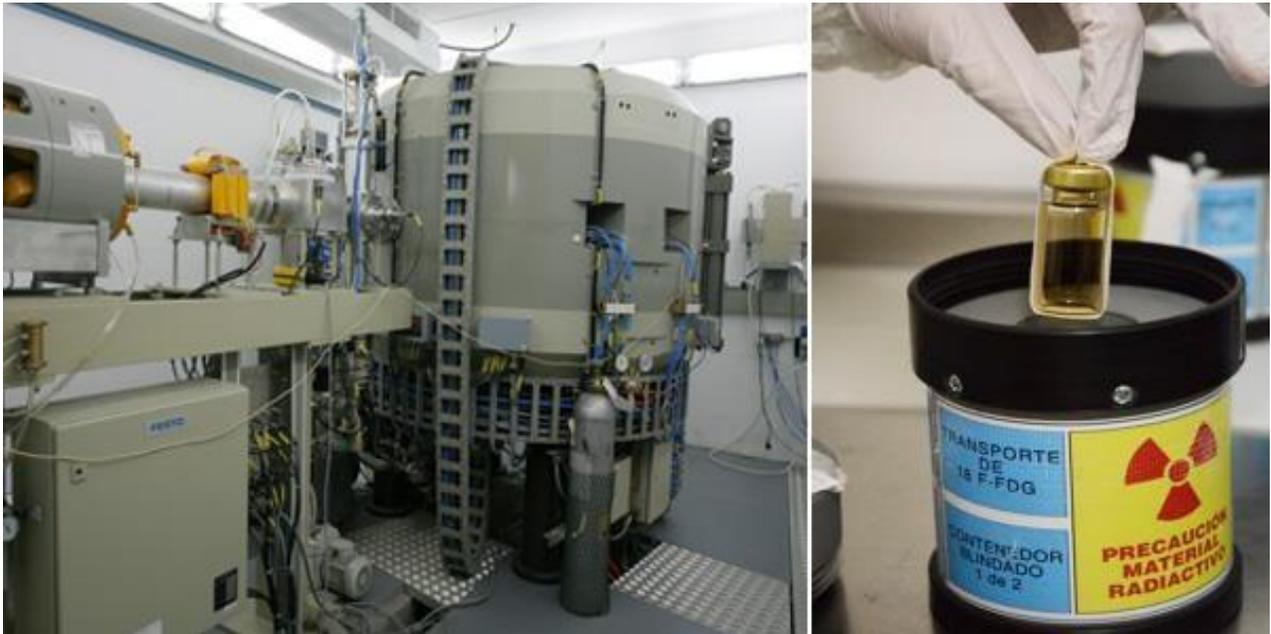


Ilustración 3 Ciclotrón CEN La Reina, Comisión Chilena de Energía Nuclear, Producción FDG

⁵ Campo eléctrico en la sección diametral entre las placas: $E=V/d$; V : voltaje en las placas, d : distancia entre placas. Dado que la distancia entre placas permanece constante, la fuerza que ejerce el campo eléctrico depende exclusivamente del voltaje sinusoidal (alterno) en las placas.

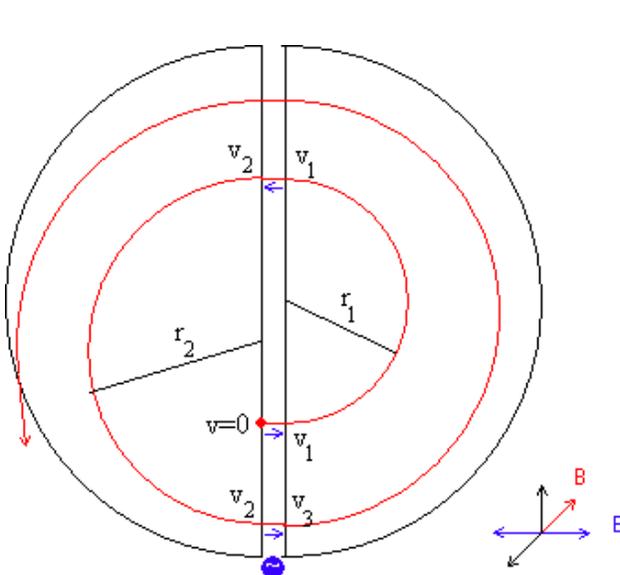
⁶ La cantidad de energía suministrada a la partícula es una función creciente en el tiempo, esto quiere decir que la energía de la partícula y, por lo tanto, su aceleración ira aumentando hasta una máxima de escape, momento en el cual la partícula se dispara al no poder ser contenida por el campo magnético.

2.2.4 Análisis físico del movimiento de la partícula

Se tiene que; F corresponde a la fuerza sobre una partícula, en este caso ejercida por un campo eléctrico E. La partícula posee valores definidos de carga:(q) y masa:(m) y está sometida a una diferencia de potencial eléctrico (voltaje) (V). Así, la partícula acelera con desplazamiento (d) en forma radial creciente hasta alcanzar la velocidad de escape (Vmax), en dicho momento la partícula sale del sistema con trayectoria tangencial al espiral descrito anteriormente.

El campo eléctrico generado por la diferencia potencial es uniforme, es decir, tiene la misma intensidad, dirección y sentido en todos los puntos del espacio. Además, cuando una carga eléctrica está en movimiento crea un campo eléctrico y un campo magnético a su alrededor. Este campo magnético realiza una fuerza sobre cualquier otra carga eléctrica que esté situada dentro de su radio de acción.

Esta fuerza que ejerce un campo magnético será la fuerza electromagnética. En este caso, al introducir cierto voltaje sinusoidal, el flujo de electrones que siguen la diferencia potencial genera un campo magnético y un campo eléctrico, que afectan al ion que se busca acelerar.



$$\vec{F} = m \vec{a}$$

$$\vec{F} = q \vec{E}$$

$$\vec{E} = \frac{V}{\vec{d}}$$

$$\text{luego : } q \vec{E} = m \vec{a}$$

$$\text{finalmente : } q \cdot \frac{V}{\vec{d}} = m \cdot \vec{a}$$

$$\text{analogamente : } \frac{q \cdot V}{\vec{d} \cdot m} = \vec{a}$$

$$\text{velocidad de escape : } V_{max} = \frac{r_c \cdot q}{m \cdot \vec{B}}$$

Figura 2:

Ilustración 4 Movimiento de una partícula en acelerador (Ángel Franco García, Campo Magnético 2016)

2.3 Flúor 18

2.3.1 Síntesis de Flúor 18

Se tiene un blanco⁷, de (18 Oxígeno) estable, que tiene 10 neutrones y 8 protones. Este se bombardea con un protón a alta energía acelerado en un ciclotrón. El protón se aloja en el núcleo del átomo y sale un neutrón, obteniendo así un núcleo inestable (radioactivo) de Flúor con 9 neutrones y 9 protones que decae por emisión de positrones (desintegración β^+) 97 % y captura electrónica 3 %. Esto en un periodo de semidesintegración de 109,771 minutos y se obtiene en forma de ácido fluorhídrico. Un protón deviene en un neutrón, un positrón y un neutrino electrónico:

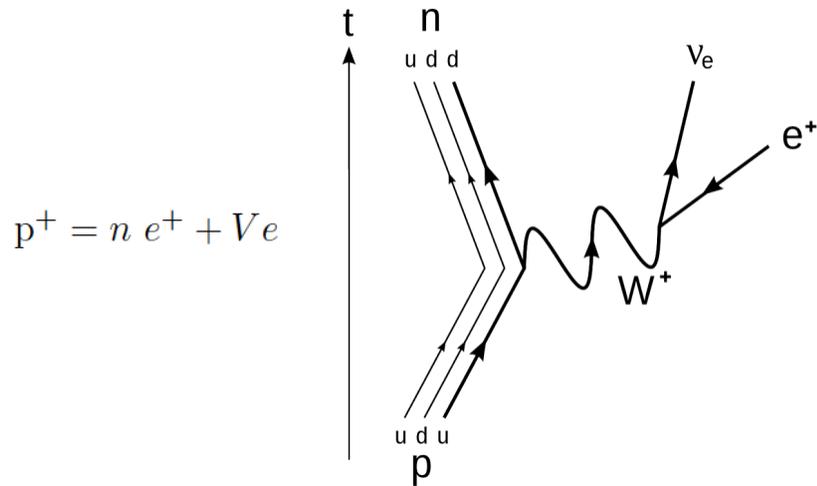


Figura 1 Diagrama desintegración Beta + (Ruddy Alvarez, Quora, UTESA 2019)

Cabe recalcar que el flúor 18 no es el producto final, y es que para aplicarlo en los exámenes PET/CT este se incorpora a la glucosa, deviniendo en FDG: Fluordesoxiglucosa, que se administra vía intra- venosa en las tomografías por emisión de positrones. Luego del decaimiento total del flúor 18, este se convierte finalmente en O 18 estable y pierde su funcionalidad en los exámenes PET/CT, pues deja de emitir positrones, por lo que luego de su obtención en el ciclotrón se debe considerar su periodo de semidesintegración para administrarlo al paciente. (Massardo, et al. 2006).

La obtención del isótopo radioactivo del flúor en el ciclotrón es parte fundamental del proceso de dos tiempos para la creación del radiofármaco FDG, ya que la glucosa no resistiría las altas energías necesarias para generar radioactividad en un compuesto por lo que se sintetiza el flúor 18 previo a unirlo a la glucosa para generar el radiofármaco final FDG.

⁷ Blanco: átomo estable que se bombardeara para obtener radioisótopos

2.3.2 Aplicación médica: PET/CT

La tomografía por emisión de positrones (Positrón Emisión Tomography) / CT (Computerized Tomography) emplea FDG como radiomarcador que se metaboliza vía intravenosa, y por emisión de positrones genera imágenes que permiten identificar y caracterizar tumores.

La Fluordesoxiglucosa⁸ es metabolizada por las células del cuerpo, y los tumores cancerígenos son aglomerados de células, por lo que en presencia de tumores habrá también una acumulación de FDG en las zonas del cuerpo donde haya tumores. Una vez se metaboliza en el cuerpo, se aprovecha el decaimiento por radiación β^+ que emite positrones que luego interactúan con los detectores del tomógrafo. Al chocar con cierta energía, se genera una imagen al detectar los positrones que se emiten del cuerpo y que impactan con los medidores. Un factor importante de esta técnica es el periodo de semidesintegración del radioisótopo que se emplea en el fármaco, pues esto determinará el tiempo de utilidad en el que este puede aplicarse a un paciente y ser efectivo. En el caso del FDG, su radioisótopo es el Flúor 18, con periodo de semidesintegración de 109,771 minutos, pasado este tiempo la efectividad del radiofármaco disminuye considerablemente. Así mismo al fin del decaimiento tanto el radiofármaco como el paciente al que se le administro, dejan de ser fuentes radioactivas pues el isótopo de flúor decae a O 18 estable y no radioactivo, por lo que pasado este periodo la persona ya no posee material de riesgo radiológico en su organismo. (Retamal, et al. 2017)

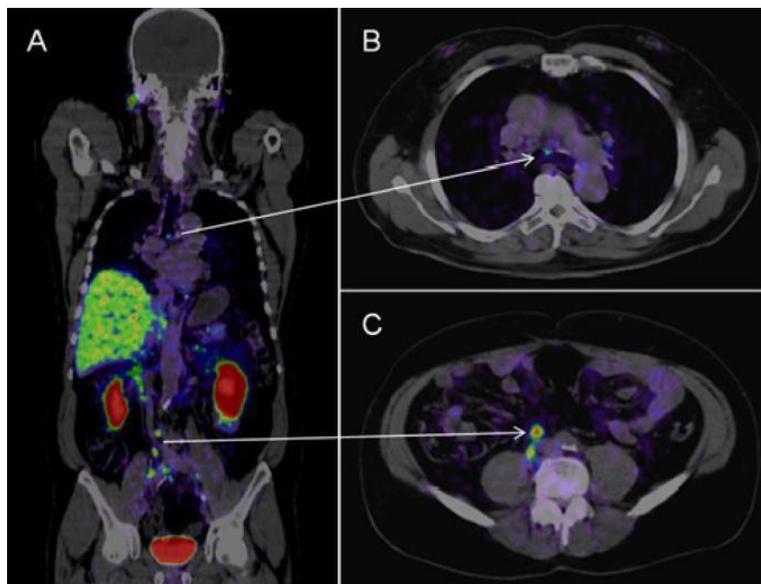


Ilustración 5 Tomografía PET/CT (NCI, 2020)

⁸ FDG: 2-fluoro-2-desoxi-D-glucosa

2.4 Normativa de seguridad radiológica en Chile

El eventual modelo de dispersión es una herramienta dentro de un proceso imprescindible para la seguridad radiológica; identificar cuantitativamente la cantidad de radiación a la que se expondría una persona cercana a una chimenea de un ciclotrón.

Sin embargo, una vez obtenida la medida, es necesario contrastarla con parámetros de referencia establecidos en la norma chilena. En este sentido, la CCHEN tiene la responsabilidad de entregar al gobierno, los lineamientos para las leyes y reglamentos necesarios para desarrollar en forma segura, las actividades de utilización pacífica de la energía atómica, es decir, normas sobre las medidas de seguridad nuclear y radiológicas.

A continuación, se presenta una revisión de los puntos más importantes de la normativa chilena pertinente a seguridad nuclear:

2.4.1 Normativa relativa a la CCHEN

Ley 16.319: Crea la Comisión Chilena de Energía Nuclear:

Artículo 3°: “El objeto de la Comisión será atender los problemas relacionados con la producción, adquisición, transferencia, transporte y uso pacífico de la energía atómica y de los materiales fértiles, fisionables y radioactivos.”

“Las funciones de la Comisión en cumplimiento de su objeto serán especialmente”:

b) “Elaborar y proponer al Supremo Gobierno los planes nacionales para la investigación, desarrollo, utilización y control de la energía nuclear en todos sus aspectos.”

2.4.2 Normativa relativa a la seguridad nuclear

Ley 18.302: de Seguridad Nuclear

“Esta ley tiene por objeto regular todas las actividades relacionadas con los usos pacíficos de la energía nuclear y con las instalaciones y las sustancias nucleares que se utilicen en ellas, con el objeto de proveer a la protección de la salud, la seguridad y el resguardo de las personas, los bienes y el medio ambiente, y a la justa indemnización o compensación por los daños que dichas actividades provocaren; de prevenir el uso ilícito de la energía, sustancias e instalaciones nucleares; y de asegurar el cumplimiento de los acuerdos o convenios internacionales sobre la materia en que sea parte Chile [...]”

Artículo 4°: Para el emplazamiento, construcción, puesta en servicio, operación, cierre y desmantelamiento, en su caso, de las instalaciones, plantas, centros, laboratorios, establecimientos y equipos nucleares y para el ingreso o tránsito por el territorio nacional, zona económica exclusiva, mar presencal y espacio aéreo nacional de sustancias nucleares o materiales radiactivos se necesitara autorización de la Comisión, con las formalidades y en las condiciones que se determinan en esta ley y en sus reglamentos. Las centrales nucleares de potencia, las plantas de enriquecimiento, las plantas de re-procesamiento y los depósitos de almacenamiento permanente de desechos radiactivos, deberán ser autorizados por decreto supremo, expedido por intermedio del Ministerio de Energía.

Artículo 6°: Toda persona que trabaje con sustancias nucleares o en una instalación, planta, centro, laboratorio o equipo nuclear deberá recibir una adecuada capacitación relativas a los riesgos

que ello involucra y a las medidas de seguridad que deberá observar. Del mismo modo deberá poseer, cuando corresponda, título profesional universitario, estudios especializados o experiencia en materias de seguridad nuclear o radiológica, en su caso.

Artículo 11º: Las instalaciones, plantas, centros y laboratorios nucleares deberán preparar y mantener planes de emergencia, revisados y aprobados por la Comisión, para los casos de accidentes nucleares que pudieren ocurrir. Estos planes contemplarían la participación de todos los organismos que, directa o indirectamente, deban intervenir en tales casos, de acuerdo con el reglamento y las condiciones de la autorización.

2.4.3 Reglamentos relativos a seguridad radiológica.

Las leyes revisadas anteriormente entregan lineamientos generales sobre la seguridad radiológica, sin embargo, lo que realmente es importante para este estudio se dispone en los reglamentos sobre seguridad radiológica, y dentro de ellos los más importantes son los siguientes:

Decreto Supremo nº3: Reglamento de protección radiológica en instalaciones radioactivas.

Artículo 1º: “El presente reglamento establece las medidas de protección personal radiológica y los límites de dosis radiactivas que pueden recibir las personas ocupacionalmente expuestas, con el objeto de prevenir y evitar la sobreexposición a las radiaciones ionizantes y sus efectos en la salud.”

“Se exceptúan, por consiguiente, de la aplicación de este reglamento a las personas que reciban dosis provenientes de la radiación natural o como consecuencia de un diagnóstico o tratamiento médico.”

Artículo 2º: “Para los fines de este reglamento se considerará persona ocupacionalmente expuesta, a aquella que se desempeñe en las instalaciones radiactivas u opere equipos generadores de radiaciones ionizantes, la que deberá, además, contar con la autorización sanitaria a que se refiere el decreto supremo N° 133, de 22 de Mayo de 1984, del Ministerio de Salud.”

“Reglamento de licencias de la Comisión Chilena de Energía Nuclear respecto de las actividades que indica.”

“Reglamento de términos nucleares”

“Aprueba normas básicas de protección radiológica”

“Reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas, u opere tales equipos y otras actividades afines.”

“Reglamento de protección física de las instalaciones y de los materiales nucleares.”

“Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos.”

“Reglamento de protección física de materiales radiactivos en instalaciones radiactivas de primera categoría.”

Además de los reglamentos revisados anteriormente, destaca para los fines de este estudio y para el interés de la comunidad el siguiente:

Reglamento de protección radiológica, MINSAL 1967, rev 2017.

TÍTULO I: DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1º: “Este reglamento establece las disposiciones para la protección de las personas de los eventuales efectos nocivos de las radiaciones ionizantes en situaciones de exposiciones planificadas, de emergencia y existentes.”

Artículo 2º: “Toda exposición a radiaciones ionizantes deberá estar basada en los principios de justificación, optimización y, cuando corresponda, sometida a limitación de dosis.”

Artículo 3º: “Las disposiciones de este reglamento se aplican en las instalaciones radiactivas, prácticas, fuentes de radiación ionizante y a las personas potencialmente expuestas a las radiaciones ionizantes generadas por éstas.”

TÍTULO II: DE LAS DEFINICIONES

Artículo 4º: “Para los efectos del presente Reglamento, los siguientes términos se interpretarán según se definen a continuación”:

Dosis: Cantidad de energía que recibe un medio a causa de la interacción con radiaciones ionizantes.

Dosis absorbida: Energía media impartida por la radiación ionizante a la unidad de masa de la materia.

Dosis comprometida: Dosis que se recibiría durante un período determinado, producto de la irradiación interna por incorporación de sustancias que emiten radiaciones ionizantes. En el caso de dosis a tejidos u órganos se denomina dosis equivalente comprometida y en el caso de dosis recibidas por todos los órganos y tejidos se denomina dosis efectiva comprometida

Dosis efectiva: Sumatoria de las dosis equivalentes en el tejido u órgano, multiplicada cada una por el factor de ponderación de un tejido correspondiente. Los factores de ponderación de cada tipo de tejido serán los establecidos en las actuales recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Dosis equivalente: Dosis absorbida por un órgano o tejido multiplicada por el factor que considera el tipo de radiación ionizante. Los factores de ponderación de cada tipo de radiación ionizante serán los establecidos en las actuales recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Exposición: Acción y efecto de someter o estar sometidas las personas a las radiaciones ionizantes.

Límite anual de dosis: Valor de dosis que, con el propósito de proteger la salud de las personas, no ha de ser sobrepasado en el período de un año. Este valor excluye las dosis provenientes de la exposición a la radiación natural y de aquella recibida con fines médicos.

Límite de dosis: Valor de la dosis efectiva o de la dosis equivalente recibida por las personas a causa de prácticas autorizadas, que no se deberá exceder.

Trabajador ocupacionalmente expuesto (TOE): Toda persona debidamente autorizada para desempeñarse en instalaciones radiactivas, ya sea en jornada completa, parcial o temporalmente, por cuenta propia o ajena, que opere o manipule una fuente de radiación o que se desempeñe dentro de una zona controlada.

Zona controlada: Área delimitada en la que son necesarias medidas de protección y disposiciones de seguridad específicas para:

- a) controlar las exposiciones normales o prevenir la dispersión de contaminación en las condiciones normales de trabajo;
- b) prevenir las exposiciones potenciales, o limitar su magnitud.

Zona supervisada: Área que no constituye una zona controlada pero dentro de la cual se mantienen bajo vigilancia las condiciones de exposición ocupacional, aunque normalmente no se requieran medidas de protección o disposiciones de seguridad específicas.

TÍTULO IV DE LAS ÁREAS DE TRABAJO Y EXPOSICIONES OCUPACIONALES

Artículo 8º: Las áreas de trabajo donde se realicen las prácticas serían zonas controladas. La autoridad competente podrá exigir, adicionalmente, la delimitación de una zona supervisada de acuerdo a las características de la práctica. Toda área que no sea clasificada como las anteriores, se considerará zona.

Artículo 11º “Todo trabajador ocupacionalmente expuesto, en situaciones de exposición planificadas, no deberá exceder los siguientes límites”:

Una dosis efectiva de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos(100 mSv en 5 años), y de 50 mSv en un año cualquiera;

Una dosis equivalente en el cristalino de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en cinco años), y de 50 mSv en un año cualquiera; una dosis equivalente en las extremidades (manos y pies) o en la piel de 500 mSv en un año. Para efectos de este reglamento, se deberá entender por un año a cualquier periodo de 12 meses consecutivos y por cinco años cualquier periodo de 60 meses consecutivos.

Artículo 13º:“ Las condiciones de exposición laboral a radiaciones ionizantes, para la mujer embarazada serían tales que, la dosis equivalente al feto no exceda a 1 mSv durante el período de gestación.”

Artículo 15º: “Las personas que se exponen a radiaciones ionizantes en actividades de formación académica, profesional o técnica, deberán tener control dosimétrico personal. Los límites de dosis, en situaciones de exposición planificadas, para estas personas son”:

- a) una dosis efectiva de 6 mSv en un año.

Artículo 16º: “ Los menores de 18 años no podrán exponerse ocupacionalmente a radiaciones ionizantes.”

Artículo 17º: “En caso que existan antecedentes fundados que un trabajador ocupacionalmente expuesto ha superado alguno de los límites establecidos, el explotador deberá, en forma inmediata, asignar al trabajador funciones que no impliquen exposición a radiaciones ionizantes, informar a la autoridad competente y realizar la investigación respectiva.”

TÍTULO V DE LAS EXPOSICIONES MÉDICAS

Artículo 20º: “Toda exposición médica deberá estar siempre justificada, considerando los beneficios que produzca a la salud de la persona y el detrimento radiológico que esta práctica pudiera causarle.”

Artículo 22º: “Los explotadores deberán minimizar las exposiciones médicas de voluntarios que participan como apoyo durante un procedimiento radiológico. Sólo se permitirán bajo el consentimiento informado del mismo y siempre que la dosis recibida no supere los 5 mSv durante el período abarcado por el examen diagnóstico o el tratamiento de cada paciente. No se permite exposiciones de menores de 18 años con estos fines.”

TÍTULO VI DE LAS EXPOSICIONES DEL PÚBLICO

Artículo 27º: “ Los explotadores deberán optimizar las prácticas a su cargo, de forma que se minimice la exposición del público.”

Artículo 28º: “Los límites de dosis para miembros del público no deberán exceder los siguientes valores”:

Dosis efectiva de 1 mSv en un año;

Dosis equivalente en el cristalino de 15 mSv en un año;

Dosis equivalente a las extremidades o a la piel de 50 mSv en un año.

Para efectos de este reglamento, se deberá entender por un año a cualquier periodo de 12 meses consecutivos y por cinco años cualquier periodo de 60 meses consecutivos

2.5 Radiación ionizante en humanos

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de partículas y ondas electromagnéticas . De forma natural las personas están expuestas a fuentes de radiación ionizante, como el suelo, el agua o la vegetación. También existen fuentes artificiales que generan radiaciones ionizantes; los rayos X y desechos radioactivos y algunos dispositivos médicos.

Según lo visto, las radiaciones ionizantes tienen muchas aplicaciones beneficiosas en la medicina, la industria, la agricultura y la investigación. Es por esto que la industria asociada a las radiaciones ionizantes es cada vez más amplia y medida que aumenta su uso, también lo hacen los posibles peligros para la salud si no se utilizan o contienen adecuadamente.

Cuando las dosis de radiación superan determinados niveles pueden tener efectos graves en la salud, tales como quemaduras cutáneas o síndrome de irradiación aguda⁹. Las dosis bajas de radiación ionizante pueden aumentar el riesgo de enfermedades a largo plazo, tales como el cáncer.

2.5.1 Conceptos y definiciones generales

La radiación ionizante corresponde a la energía liberada por átomos inestables en forma de ondas electromagnéticas: rayos gamma o rayos X o partículas: partículas alfa , beta y neutrones. Esta inestabilidad provoca una desintegración espontánea de los átomos, que se denomina radiactividad, y la energía excedente que se emite es una forma de radiación ionizante. Los elementos inestables que se desintegran y emiten radiación ionizante se denominan radioisótopo, como el flúor 18 que se produce como desecho y producto en los ciclotrones. Cada radioisótopo se caracteriza por el tipo de radiación que emite, la energía de la radiación y su periodo de semidesintegración.

La actividad radiactiva, se expresa en becquerel (Bq): un becquerel corresponde a una desintegración por segundo.

La semivida es el tiempo necesario para que la actividad de un radioisótopo disminuya por la desintegración a la mitad de su valor inicial. Este valor es único para cada radioisótopo y puede variar desde una fracción de segundo a millones de años; por ejemplo, el yodo 131 tiene una semivida de 8 días mientras que el carbono 14 tiene una semivida de 5730 años (OMS, 2016).

⁹ Síndrome de irradiación: conjunto de síntomas potencialmente mortales que resultan de una exposición puntual de los tejidos biológicos de una parte importante del cuerpo a una fuerte dosis de radiaciones ionizantes (ATSDR, 2020)

2.5.2 Fuentes de radiación ionizante

La radiación ionizante es aquella que tiene suficiente energía para ionizar átomos y moléculas al interactuar con ellos. Esta radiación puede provenir de diversas fuentes naturales y artificiales.

1. Radiación cósmica: Proviene del espacio exterior, especialmente de explosiones estelares y eventos como supernovas. La radiación cósmica está presente en todo momento y su intensidad varía según la altitud y la ubicación geográfica.
2. Radiación terrestre: Algunos materiales presentes en la corteza terrestre emiten radiación ionizante de forma natural. Por ejemplo, el uranio, el torio y el radio son elementos radiactivos que se encuentran en rocas y suelos, y su desintegración produce radiación.
3. Radón: El radón es un gas radiactivo que se produce a partir de la desintegración del uranio presente en la tierra. Puede infiltrarse en edificios y acumularse en espacios cerrados, especialmente en sótanos. La inhalación de altas concentraciones de radón puede aumentar el riesgo de cáncer de pulmón.
4. Radiación solar: La radiación solar incluye luz visible, rayos infrarrojos y una pequeña cantidad de radiación ultravioleta (UV). Aunque la luz visible y los rayos infrarrojos no son ionizantes, la radiación ultravioleta puede causar daño celular y aumentar el riesgo de cáncer de piel.
5. Radiación médica: Las radiografías, tomografías computarizadas (TC), fluoroscopias y tratamientos de radioterapia utilizan fuentes artificiales de radiación ionizante. Estas técnicas son valiosas en medicina, pero se utilizan con precaución para minimizar la exposición a la radiación.

Es importante tener en cuenta que la exposición prolongada o excesiva a la radiación ionizante puede aumentar el riesgo de desarrollar enfermedades como el cáncer. Las medidas de protección radiológica y las regulaciones adecuadas son fundamentales para minimizar los riesgos asociados con estas fuentes de radiación.

La radiación natural proviene de distintas fuentes, como los más de 60 materiales radiactivos naturales presentes en el medio ambiente; suelo, agua y aire. Además, las personas se exponen permanentemente a la radiación natural de los rayos cósmicos, especialmente a gran altura, en promedio, el 80 % de la dosis anual de radiación de fondo que recibe una persona procede de fuentes de radiación naturales, terrestres y cósmicas. Los niveles de la radiación de fondo varían geográficamente debido a diferencias geológicas. En determinadas zonas la exposición puede ser más de 200 veces mayor que la media mundial. (Woodside, Gayle, 1997)

2.5.3 Exposición a la radiación ionizante

La exposición a la radiación puede ser de carácter interno o externo y puede recibirse por diferentes vías.

La exposición interna a la radiación ionizante se produce cuando un radioisótopo es inhalado, ingerido o entra de algún otro modo en el sistema del cuerpo humano. La exposición interna termina cuando el radioisótopo se elimina del cuerpo, ya sea espontáneamente gracias a un tratamiento.

Por otro lado, la exposición externa se produce cuando el material radiactivo presente en el aire se deposita sobre la piel o la ropa. La irradiación externa se detiene cuando la fuente de radiación está blindada o la persona sale del campo de irradiación.

Las personas pueden exponerse a la radiación ionizante en diferentes circunstancias; en casa, en lugares públicos (exposiciones públicas), en el trabajo (exposiciones profesionales) o en un entorno médico, este último representa el 98 % de la dosis poblacional con origen en fuentes artificiales y el 20 % de la exposición total de la población. Cada año se realizan en el mundo más de 3600 millones de pruebas diagnósticas radiológicas, 37 millones de pruebas de medicina nuclear y 7,5 millones de tratamientos con radioterapia. (OMS, 2016) Las situaciones de exposición a la radiación ionizante pueden clasificarse en tres categorías. La primera, la exposición planificada, es el resultado de la introducción y funcionamiento deliberados de fuentes de radiación con fines concretos, como en el caso de la utilización médica de la radiación con fines diagnósticos o terapéuticos, o de su uso en la industria o la investigación. La segunda, la exposición existente, se produce cuando ya hay una exposición a la radiación y hay que tomar una decisión sobre su control, como en el caso de la exposición al radón en el hogar o en el lugar de trabajo, o de la exposición a la radiación natural de fondo existente en el medio ambiente. La tercera categoría, la exposición en situaciones de emergencia, tiene lugar cuando un acontecimiento inesperado requiere una respuesta rápida, como en el caso de los accidentes nucleares o los actos criminales. (OMS, 2016)



Ilustración 6 Radiación en humanos, BBC Mundo, Medio Ambiente 2011

2.5.4 Efectos de las radiaciones ionizantes en la salud

Para medir la radiación ionizante en términos de su potencial para causar daños se utiliza la dosis efectiva. La unidad para medirla es el sievert (Sv), que toma en consideración el tipo

de radiación y la sensibilidad de los órganos y tejidos.

Más allá de ciertos umbrales de tolerancia, la radiación puede afectar el funcionamiento de órganos, tejidos, y producir efectos adversos agudos en el cuerpo, tales como enrojecimiento de la piel, caída del cabello, quemaduras por radiación o síndrome de irradiación aguda. Estos efectos son directamente proporcionales con la cantidad de dosis absorbida. Por ejemplo, la dosis para el síndrome de irradiación aguda es de aproximadamente 1 Sv (1000 mSv).

Si la dosis de radiación es baja o la exposición a ella tiene lugar durante un periodo prolongado, el riesgo es considerablemente menor porque hay más probabilidades de que se reparen los daños. Sin embargo, sigue existiendo un riesgo de efectos a largo plazo, como el cáncer. La probabilidad de que estos efectos se manifiesten es directamente proporcional a la dosis de radiación recibida. El riesgo es mayor para los niños y adolescentes, pues son mucho más sensibles a la radiación que los adultos. Mientras que en embarazos, la radiación ionizante puede producir daños cerebrales en el feto tras la exposición prenatal aguda a dosis superiores a 100 mSv entre las 8 y las 15 semanas de gestación. Además, los estudios epidemiológicos indican que el riesgo de cáncer tras la exposición fetal a la radiación es similar al riesgo tras la exposición en la primera infancia. (OMS, 2016) (Julie, TJoR, 2012)

Clasificación de efectos

Efectos deterministas: son efectos umbral de salud, que están relacionados directamente con la dosis de radiación absorbida y la gravedad del efecto aumenta a medida que aumenta la dosis. (Connor, 2020)

Efectos estocásticos: ocurren por casualidad, generalmente sin un nivel umbral de dosis. La probabilidad de aparición de efectos estocásticos es proporcional a la dosis, pero la gravedad del efecto es independiente de la dosis recibida. (Connor, 2020)

Para limitar estos efectos y asegurar la seguridad radiológica existen diversas medidas de protección, entre las cuales está el corrector entendimiento de los contaminantes emitidos a la atmósfera.

2.6 Dispersión Atmosférica Y Seguridad Nuclear

La dispersión atmosférica se refiere al transporte de cierto efluente por el viento y su difusión por turbulencia atmosférica. Luego, un correcto modelo matemático de dispersión atmosférica relaciona la cantidad de efluente (o ratio de descarga) y la distribución de su concentración en la atmósfera. Las propiedades atmosféricas locales determinan el comportamiento de la pluma, por lo que la dispersión del efluente puede considerarse una función dependiente de parámetros meteorológicos en el tiempo. En el caso puntual de la descarga de radioisótopos, deberán considerarse parámetros extra para describir correctamente la dispersión, como por ejemplo la actividad radioactiva, periodo de desintegración, proceso de desintegración entre otros.

Las publicaciones a este respecto han sido motivadas por fines principalmente militares y/o en respuesta a accidentes que requieren control de amenazas radioactivas y contaminación de aire, sin embargo se recalca la necesidad de contar con lineamientos para el manejo de descarga de material radioactivo en condiciones normales de operación, pues pese a que existen variedad de modelos de dispersión atmosférica de contaminantes, estos no suelen ser aplicables al manejo de sustancias radioactivas.

2.6.1 Aplicabilidad de modelos a descarga de material radioactivo

Una primera aclaración pertinente, es diferenciar que, las instalaciones nucleares emiten pequeñas cantidades de material radioactivo en condiciones normales de operación, sin embargo, son capaces de liberar grandes cantidades de contaminantes en accidentes, por lo que es imprescindible para cada instalación nuclear que cuente con lo siguiente:

Evaluación periódica del riesgo radiológico del público y/o población cercana.

Evaluación de posibles accidentes en la etapa de diseño del proyecto y generación de planes de emergencia.

Evaluación de dosis radiológica en público general en etapa operacional, con datos de operación normal y condición meteorológica de la zona.

Medición de impacto ambiental en operación normal y en caso de accidente, contar con un modelo de dispersión atmosférica para dichos eventos.

Algunas consideraciones previas de un modelo de dispersión aplicable a descargas radioactivas

Consideraciones previas de un modelo de dispersión aplicable a descargas radioactivas

- La descarga de sustancias radioactivas sucede en un punto específico.(exclusa, chimenea, etc.)
- El tiempo de estudio de la pluma de contaminante debe depender del periodo de desintegración de la sustancia
- La cuantificación de la deposición y absorción en humanos, vegetación y otras superficies de interés.
- La diferencia en la actividad radioactiva a la salida de la exclusiva y en el punto de medición

2.7 Escala del modelo y estructura de la atmósfera

Para contar con un modelo de dispersión efectivo, deben considerarse factores importantes como la dinámica de fluidos turbulentos, pues las variaciones en la atmósfera son un parámetro importante que define el comportamiento de la pluma de cualquier contaminante. Además, la desintegración se produce por decaimiento beta positivo donde un neutrón se convierte en un protón, un electrón y un antineutrino electrónico. Este proceso físico permite la detección por emisión de positrones

Para la interpretación de los modelos, se propone una escala que considera el espacio en la atmósfera que considerara la pluma desde el punto de emisión. Este informe estudiara los modelos a escala local acotada en condiciones climáticas típicas de la zona, además de los fenómenos típicos como la dilución por deposición, etc.

La zona de estudio estará limitada por un diámetro de 3 km con centro en el punto de emisión del ciclotrón. Esta zona comprende terrenos baldíos, industriales y residenciales, estos últimos son de especial consideración pues las concentraciones en estos sectores afecta a personas directamente.

Una vez en la atmósfera, y según se ha descrito previamente el transporte de la carga contaminante depende del flujo del viento, y esta sujeto a difusión y a procesos que modifican su comportamiento. A continuación se analizan los factores que afectan el comportamiento de la pluma.

2.7.1 Comportamiento Cinemático de efluentes liberados de una fuente puntual.

La mayoría de los modelos, consideran que a la fuente, como un punto ideal, ignorando la presencia de energía y condiciones ambientales que interfieran. Pero en la realidad, los puntos de emisión son secciones limitadas y naturalmente finitas, con propiedades físicas que la condicionan.

Esto provoca cambios en la pluma de viento, y requiere correcciones matemáticas como las que se vieron en la obtención perimétrica, que resulta en el modelado de un gas liberado a la atmósfera, que viaja con el viento y se propaga progresivamente en una nube que es afectada por flujos turbulentos, variando su trayectoria y comportamiento en el tiempo.

Para la simplificación del modelo, se trabaja con el concepto de "puffs", bocanadas o cargas de gas, donde un flujo continuo de gas liberado a la atmósfera se entiende como una sucesión de puffs, luego la sucesión de puffs da lugar a una sucesión de nubes producto de estas descargas, y estas nubes dan lugar al concepto final de pluma.

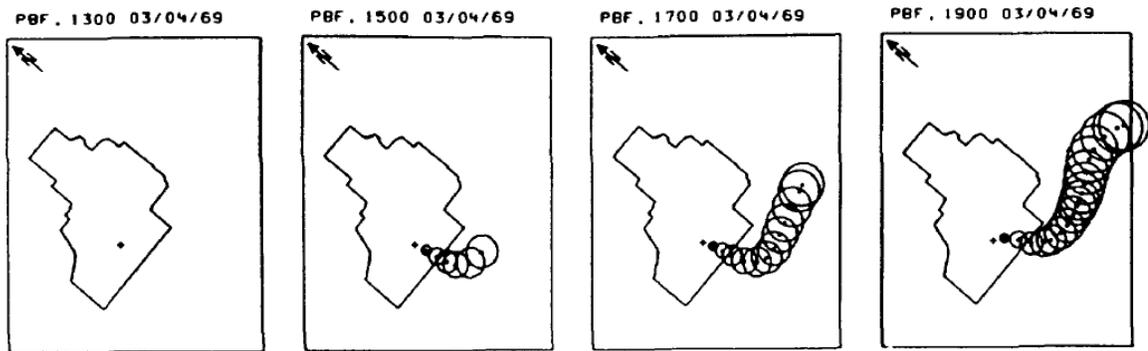


Figura 2 Desarrollo de una pluma a partir de una secuencia de puffs, Start y Wendell (1974). Wendell (1974)

2.7.2 Efectos de la temperatura en la dispersión

Una primera aclaración pertinente es la introducción del concepto de gradiente de temperatura, que corresponde a la variación de temperatura por unidad de distancia, que para el caso atmosférico, se considera un gradiente vertical. El efecto de este gradiente sobre la estabilidad de la atmósfera se puede ilustrar de forma ideal, considerando una porción de aire ascendente de forma vertical, que debido al movimiento de remolino, va lo suficientemente rápido como para que el proceso pueda ser considerado adiabático. Luego, dependiendo de las condiciones se tienen distintos valores para el gradiente;

Gradiente Adiabático Seco (GAS): cuando una parcela de aire es forzada a ascender se enfría, pero no cede energía en forma de calor al aire que la rodea. En estas situaciones se dice que la temperatura disminuye siguiendo una tasa de cambio adiabático. La tasa de cambio adiabático de una masa de aire en ascenso es de -0.98 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). (Sistema Atmosférico, Tasas de cambio adiabática, ITE Gobierno de España)

Gradiente Adiabático Húmedo (GAH): cuando la masa de aire en ascenso se enfría hasta alcanzar el punto de rocío, el vapor de agua se condensa formándose nubes y liberando el calor latente. Este aumento de temperatura provoca un aumento en el trabajo realizado por la masa de aire, ascendiendo a mayor velocidad. Normalmente con una tasa de cambio de -0.55 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$). (Sistema Atmosférico, Tasas de cambio adiabática, ITE Gobierno de España)

Condiciones Promedio: -0.7 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)

Consideremos que la atmósfera tiene un gradiente de temperatura igual al gradiente adiabático seco, en esas condiciones, el cuerpo ascendente de aire tendrá la misma temperatura de sus alrededores y no tendrá efectos de aceleración causado por fenómenos de flotación. Una atmósfera con estas características se la llama neutral. Luego, si la temperatura atmosférica decae en función de la altura con un ratio mayor que el gradiente adiabático, la masa de aire ascendente se calentará y será por tanto menos densa que sus alrededores, lo que supondrá una aceleración por efectos de flotación que intensificará el movimiento en el eje y . Esta situación es típica de una zona atmosférica compleja e inestable con altos niveles de turbulencia.

Por otro lado, si la temperatura disminuye con la altura a una tasa menor que la del gradiente adiabático, o si aumenta con la altura, la porción vertical de aire tiene menor temperatura que sus alrededores, esto provoca que su movimiento en el eje vertical sea amortiguado y su turbulencia disminuya.

2.7.3 Sobre las capas de la atmósfera

Durante los primeros momentos de la liberación, el material emitido cerca del suelo está confinado en las primeras capas de la atmósfera, esta capa se conoce como capa límite o capa de mezcla. Luego, distintas capas en la atmósfera pueden presentar distintas condiciones de estabilidad.

Podemos construir una relación entre la altura, y por tanto las capas de la atmósfera con la temperatura como sigue;

Troposfera: En promedio, la temperatura decrece a una altura de 10 km, en esta capa, la troposfera, es cuando la actividad convectiva es más fuerte¹⁰, dando lugar a la mayoría de los fenómenos climáticos.

¹⁰ Las corrientes de convección son el resultado de un calentamiento por gradientes de temperatura. Los materiales cálidos son más ligeros, por lo que suben, mientras que los materiales fríos son más pesados (más densos) y por lo tanto se hunden.

Estratosfera: Sobre la troposfera se encuentra la estratosfera, y dado que son capas de fluido no existe un límite perfectamente definido, pero podemos considerar que se extiende desde los 10 km hasta los 50 km. En esta capa, la temperatura es prácticamente independiente de la altura, es decir, tiende a una constante conforme aumenta la altura. La estratosfera se considera una capa estable con un pequeño coeficiente de difusión vertical.

Tropopausa: La estabilización de la temperatura supone una zona, una capa intermedia entre la troposfera y la estratosfera. La altura a la que comienza la tropopausa varía según la temporada del año y la latitud, y dado que la troposfera es altamente inestable y la estratosfera tiende a la estabilidad, la tropopausa actúa como un tapón.

2.7.4 Sobre la variabilidad día-noche

Además, como es de esperarse, los perfiles de temperatura cambian entre el día y la noche, pues las variaciones de temperatura durante un típico día de buen clima son más grandes en las partes más bajas de la atmósfera, cerca del suelo, donde el ciclo diario de calentamiento por la luz del sol induce un ciclo correspondiente de cambio en la temperatura del aire.

Al igual que los parámetros anteriores, la amplitud de la variación diaria de la temperatura del aire decae con la altitud, y es prácticamente despreciable a partir de unos cientos de metros. Por otro lado, más cerca del suelo y durante el período de insolación el suelo y las capas de aire cercanas al suelo se calientan más que las capas superiores, ocasionando un proceso adiabático negativo. Mientras que por la noche, el suelo se enfría rápidamente por pérdidas por radiación, las capas más bajas de la atmósfera se enfrían más rápido que las superiores, por lo que con la altura el gradiente es positivo o tiende al aumento.

Finalmente, los cambios por las condiciones del día tienen impactos no solo en la temperatura, sino también en la intensidad de la turbulencia, en función de la estabilidad en la atmósfera como se revisó anteriormente, bajo condiciones estables se reduce la desviación en los ejes y por tanto la turbulencia. Considerando las variables expuestas, podemos generar un esquema de la estructura de la temperatura en la atmósfera.

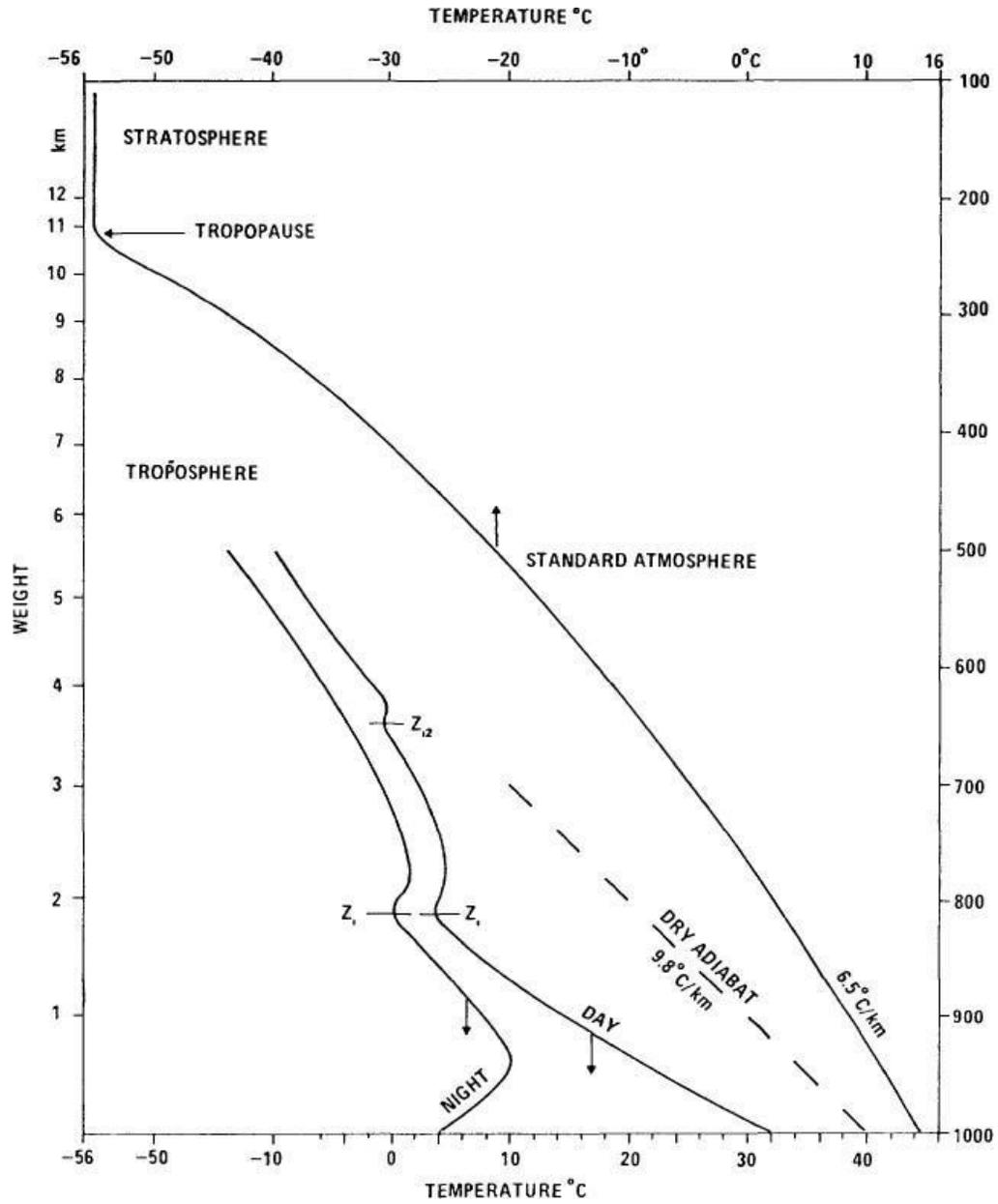


Figura 3 Estructura de temperatura (IAEA TECDOC 379)

2.7.5 Efectos del viento en la dispersión

El parámetro que proporciona el viento, para el modelado de la dispersión es la velocidad, que típicamente incrementa con la altura sobre el suelo, esto por que, las fuerzas de fricción que se tienen cerca del suelo no se transmiten a toda la atmósfera, por lo que a suficiente altura, los efectos de la fricción son despreciables y la velocidad del viento solo dependerá de la presión atmosférica y propia la rotación de la tierra. A esta velocidad del viento se la conoce como viento geostrófico, y las condiciones de fricción y rotación de la tierra no solo afectan la velocidad sino también la dirección del viento. Es así como se configura la dispersión de la pluma, que avanza con la velocidad y dirección del viento. Luego, la variación de estos dos parámetros en función de la altura recibe el nombre de Espiral de Ekman". Mas allá de la velocidad como parámetro definido y constante, lo que realmente es relevante para el modelado, es la variación o fluctuación de la velocidad en función del tiempo y del espacio. La variación sucede rápidamente producto de un amplio rango de tamaños de remolinos que suceden en la atmósfera. Esta situación fluctuante de la velocidad del viento es la principal causa del crecimiento y transporte de las nubes de contaminante.

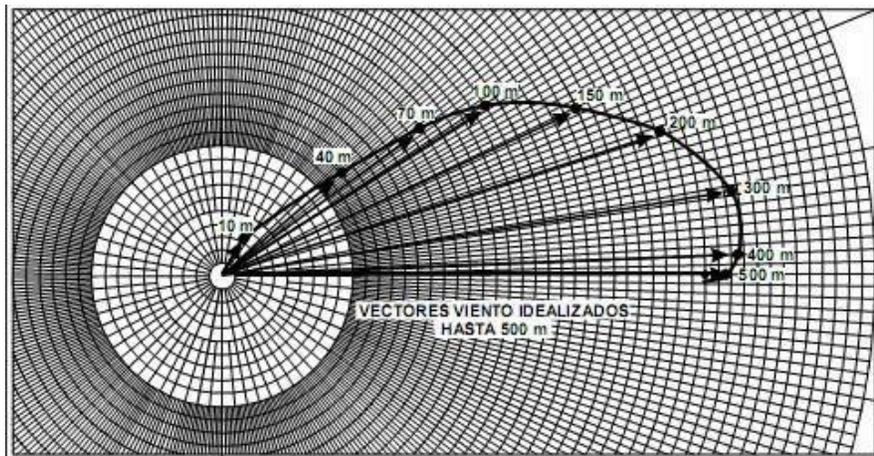


Figura 4 Espiral de Ekman (Flap 152, Roberto Gomez)

Típicamente, se asocia una disminución en la concentración de contaminantes en el aire con el aumento de la velocidad del viento, pues aumenta su dispersión. Y aunque, esta relación no se cumple exactamente para todas las alturas de emisión y en todas las condiciones atmosféricas podemos decir que en el caso de la emisión por chimeneas, la concentración horaria máxima normalizada de contaminantes a nivel del suelo es directamente proporcional a la velocidad del viento, en condiciones atmosféricas estables, inestables y neutras. Esto como consecuencia del balance entre la dilución de contaminantes generada por la velocidad del viento y la influencia del viento sobre la elevación de la pluma.

2.8 Modelado Paramétrico

El modelo de dispersión, describe el comportamiento de la pluma, es decir, el ratio de emisión y la concentración en distintos puntos del espacio, teniendo en cuenta las propiedades de la atmósfera donde ocurre la dispersión.

Hay diversas aproximaciones para formular dicho modelo, y para este estudio se analizaran las más importantes que propone la literatura al respecto, teniendo como referencia las publicaciones más importantes al respecto, para finalizar con el modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes que se emplea extendidamente en estudios a estas escalas. Es así como los modelos aplicables se dividen en dos; Teóricos y Empíricos, los modelos empíricos se basan en modelos teóricos pero utilizan parámetros cuyos valores se han obtenido mediante experimentos de difusión, utilizando trazadores. Los valores de los parámetros están relacionados con las condiciones meteorológicas observables.

A continuación, se revisarán los modelos teóricos más relevantes:

Modelo estadístico: La construcción de este modelo se basa en teoría estadística, es decir, que la dispersión del contaminante es descrita en términos de propiedades estadísticas del movimiento turbulento en escalas de tiempo de horas.

Teoría de la similitud: Los parámetros de control son determinados y el comportamiento de los efluentes se deriva de análisis dimensional y también es aplicable a escalas de tiempo cortas.

Teoría del gradiente: Se hace una analogía entre difusión molecular y mezcla turbulenta que se traduce en ecuaciones diferenciales que describen la difusión y que son resultados para la situación apropiada. Este enfoque es aplicable a todas las escalas de tiempo.

2.8.1 Modelo basado en la teoría estadística

Estas aproximaciones fueron introducidas por Tylor en su paper publicado en 1920, que fue base y pionero en la dispersión de contaminantes. Se considera un número de partículas liberadas en un punto, la distribución de estas partículas en un tiempo t producto de las fluctuaciones turbulentas se nota como sigue:

$$\sigma^2(T) = \overline{X^2}$$

Donde X corresponde a la distancia desde el punto de emisión, la barra significa que el cálculo corresponde a un promedio:

$$\frac{d\overline{X^2}}{dt} = 2\overline{X} \frac{d\overline{X}}{dt}$$

Luego,

$$\overline{2Xu'}$$

Donde u' corresponde a la fluctuación turbulenta del viento en las partículas (velocidad). Este ratio de dispersión debe ser expresado en términos de la velocidad del viento en intervalos sucesivos de tiempo, obteniendo:

$$\frac{d\overline{X^2}}{dt} = 2 \int_0^t \overline{u'(t)u'(t+\varepsilon)} d\varepsilon$$

Tal que u' es siempre medido en la posición particular en un sistema lagrangiano, en condiciones de homogeneidad y estacionariedad, las propiedades en promedio tienen comportamiento uniforme en el espacio, por lo que podemos escribir la expresión en términos de un coeficiente de correlación de tipo lagrangiano como sigue:

$$R(\varepsilon) = \frac{\overline{u(t)u'(t+\varepsilon)}}{\overline{u'^2}}$$

resultando las desviaciones estándar en función del tiempo;

$$\sigma^2(T) = 2\overline{u'^2} \int_0^T \int_0^t R(\varepsilon) d\varepsilon dt$$

Finalmente, la concentración X se obtiene para dos casos, para una masa de gas o puf se asume una expresión de triple Gaussiana y para la pluma completa se asume una expresión Gaussiana doble:

Modelo Puff

$$X(x, y, z, t) = \frac{Q}{\sqrt{(2\pi)^3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)$$

Donde σ_x , σ_y , σ_z , son desviaciones estándar y (x,y,z) están medidos respecto al sistema de movimiento de coordenadas con origen en el centro de la nube. El eje x corresponde a la dirección del viento, el eje y es el movimiento horizontal cruzado y el z es el movimiento vertical, Q corresponde a la carga en Bq¹¹ en el punto de emisión.

Modelo de Pluma

$$X(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \bar{u} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)$$

Esta configuración puede obtenerse de la ecuación del modelo de puffs, si consideramos estado estacionario y fuente continua. Ambos modelos estadísticos (puffs y pluma) son la base para el modelo gaussiano, pero por si solos tienen aplicaciones limitadas, pues deben asumir homogeneidad y estado estacionario y estas condiciones son difícilmente encontrables en la atmósfera, especialmente en largas distancias y tiempos prolongados. Sin embargo son claves para el entendimiento de los procesos de dispersión atmosférica. (Taylor, 1920)

¹¹ Bequerelio: Unidad en el sistema internacional que equivale a una desintegración por segundo, de emisión beta (ForoNuclear España, Glosario de términos)

2.8.2 Modelos basados en teoría de similitud

La teoría de la similitud se utiliza en la dispersión atmosférica para desarrollar modelos que permiten predecir cómo se dispersarán los contaminantes en la atmósfera en función de ciertos parámetros. Estos modelos se basan en la idea de que las condiciones atmosféricas y las características del terreno en el área de estudio son similares a las condiciones en otras áreas donde se han realizado mediciones y estudios.

En estos modelos, la dispersión se expresa en términos de velocidades y longitudes. Y existen diversos autores especialistas en distintas áreas del modelado; los principios del modelo, aplicados a flujos normales se detallan por Batchelor (1959, 1964), mientras que para regímenes diabáticos la referencia es el estudio de Gifford (1962). Estos estudios se aplican principalmente para estudiar aspectos de la dispersión en las capas límites de la atmósfera (Csandy 1969, Sitaraman y Shirvaikar, 1974).

Es importante tener en cuenta que estos modelos son simplificaciones de la complejidad real de la dispersión atmosférica y están sujetos a ciertas limitaciones. Además, hay otros modelos disponibles que pueden adaptarse a diferentes situaciones y condiciones atmosféricas específicas

2.8.3 Modelo basado en el gradiente o teoría K

En los modelos de gradiente, la ecuación propuesta se resuelve de forma explícita, ya sea analítica o numéricamente. La ecuación de difusión se construye a partir de la difusión molecular, sin embargo, es importante notar que la ecuación es una aproximación para la dispersión atmosférica. (López Jiménez Petra, Modelo gaussiano de dispersión de contaminantes, UPV,2011)

Ley de Fick de difusión molecular de masa describe el comportamiento de una concentración C en el espacio. Teniendo en cuenta un comportamiento puramente dimensional de la masa como una componente de cálculo diferencial afectada únicamente por coeficientes de dispersión turbulenta.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right] - \lambda c + S(x, y, z, t)$$

Donde; K_x, K_y, K_z : coeficientes vectoriales de dispersión turbulenta, el término λ corresponde a la depleción¹² que afecta a la carga contaminante, producto ya sea del decaimiento radioactivo, deposición húmeda u otro proceso que afecte a la pluma. $S(x, y, z, t)$ corresponde a un término conocido como fuente o sumidero y representa la pérdida de contaminante. La distribución de la concentración de contaminante debe ser obtenida como solución de esta ecuación, con apropiadas condiciones iniciales y del entorno.

¹² Depleción: Disminución o pérdida de la cantidad de algo; este concepto, aplicado en este contexto, podría entenderse como pérdida de sustancia (gas) en la atmósfera

Concepto de K

El concepto de difusión turbulenta K, es una generalización del concepto de difusión molecular que se extrae de la teoría cinética de los gases. En esta última, la diferencia de potencial, la transferencia de masa o calor ocurren por causa del movimiento de las partículas, traducido en coeficientes de viscosidad, conductividad o difusión. Por otro lado en procesos de turbulencia, la transferencia ocurre producto de la presencia e remolinos o parcelas de aire.

El proceso de disipación continua que era base del modelo estadístico es reemplazado por un proceso

discreto, que evoluciona paso a paso en una distancia L. Luego obtenemos que el coeficiente de difusión

turbulenta K se construye a partir de la distancia y la velocidad como sigue:

$$K = L\sqrt{w'^2}$$

Donde, w'^2 corresponde a la velocidad media cuadrática. Una consideración importante que debe ser tomada en cuenta, es que en el modelo de gradiente, existe una limitación considerable en cuanto a la anisotropía¹³ de la constante K. Las tasas de transferencia de masa, en las direcciones horizontales y verticales suelen ser diferentes entre si en la atmósfera.

Este carácter anisótropo de la dispersión se debe a que la transferencia en la dirección vertical (z) se ve fuertemente influenciada por las variaciones de temperatura según la altura, por lo que distintas capas en la atmósfera tendrán distintas estabilidades y la estructura de la pluma cambiara en función de la capa. Sin embargo en determinadas situaciones Kz no siempre puede determinarse por la capa superficial en la que se encuentra.

¹³ La anisotropía (opuesta de isotropía) es la propiedad general de la materia según la cual determinadas propiedades físicas, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc. varían según la dirección en que son examinadas. Algo anisótropo podría presentar diferentes características según la dirección. (Química.ES, LumitosAG, 1997-2022)

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Modelo Gaussiano Para Escala Local

Luego de revisar los modelos estadísticos y teóricos, que dan forma a este modelo semi-empírico, se resuelve que el modelo Gaussiano es el óptimo para una aplicación en escala local de dispersión. Existen diversos modelos alternativos al Gaussiano, sin embargo, están contruidos de forma tal que sus parámetros son más apropiados para largas distancias.

Este estudio se centra en la obtención de datos relativos a la escala local, por lo que la metodología empleada está orientada a obtener el modelo gaussiano optimo aplicable a los ciclones y sus emisiones. Para ello, se presentará el modelo en condiciones ideales y se le aplicaran las correcciones que el caso de estudio amerite.

3.1.1 Modelo Gaussiano en condiciones ideales

El modelo gaussiano puede obtenerse a partir del modelo estadístico o como una solución del modelo basado en teoría de gradientes (k) revisados anteriormente, aplicando los supuestos de velocidad del viento y coeficientes de difusión independientes de la distancia. La dispersión puede expresarse de dos formas; el modelo de puffs, que entrega la concentración instantánea de una sola liberación, y el modelo de pluma, que presenta una integral en el tiempo de la concentración con una liberación continua. Ambos consideran un contaminante emitido desde un punto conocido y estudiado bajo condiciones ideales de uniformidad y terreno. Sin embargo, las condiciones en la práctica difieren bastante de estas consideraciones ideales, por lo que surge la necesidad de realizar modificaciones a la formulación inicial.

Modelo Gaussiano con correcciones de Pasquill – Gifford

Este modelo se basa en una expresión tridimensional en el tiempo, y trabaja bajo el supuesto de que la distribución de las concentraciones se ajusta a una función de distribución normal, es decir, la concentración máxima se obtiene en el centro de la pluma, y permite conocer la concentración en un punto del plano euclideo.

$$C_{(x,y,z,t)} = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right]$$

Donde;

- $C(x,y,z)$ es la concentración del contaminante en un punto dado (x,y,z) son las coordenadas en metros, siendo x la dirección del viento
- Q corresponde al caudal de la emisión en g/s
- u es la velocidad del viento en m/s
- t es el tiempo de viaje del contaminante en segundos
- σ_x σ_y σ_z son las desviaciones estándar de la distribución

3.1.2 Modelo Gaussiano para un punto de emisión

La distribución de la concentración a partir de un único punto de emisión está dada por el modelo de puffs, sin embargo, el modelado de pluma integra al tiempo, por lo que luego de la revisión previa se resuelve que es el óptimo para la emisión de radio isótopos por chimenea e históricamente es el más utilizado (IAEA TECDOC.379) para estos fines.

Se aplican una serie de consideraciones iniciales:

- Sustancia conservativa: $T_s = 0$
- Régimen estacionario: $dC/dt = 0$
- Dirección del viento axial al eje x (plano)
- Velocidad Uniforme: U

Se asume el punto de emisión como el origen del sistema euclidiano de coordenadas.

$$\bar{c}[x, y, z] = \frac{Q}{4\pi x \sqrt{K_y K_z}} \exp \left[-\frac{y^2 U}{4K_y x} - \frac{z^2 U}{4K_z x} \right]$$

Aplicación física mediante cambio de variable, obteniendo una ecuación que determina la concentración en euleriano de cierto contaminante. Esta concentración dependerá del caudal de salida Q , la altura de la chimenea H y los coeficientes de dispersión espacial.

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{2K_y x}{U}}$$
$$\sigma_z = \sqrt{\frac{2K_z x}{U}}$$

Obtenemos finalmente, la ecuación de Gauss para dispersión de contaminantes, que considera lo siguiente:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2 u \pi \sigma_y \sigma_z} \left[e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \right] \left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} \right]$$

- (x,y,z) = coordenadas espaciales en metros
- C = Concentración de contaminante en el espacio
- Q = Caudal de salida por la chimenea (g/s)
- u = velocidad promedio del viento
- σ_y σ_z = desviaciones estándar en el espacio

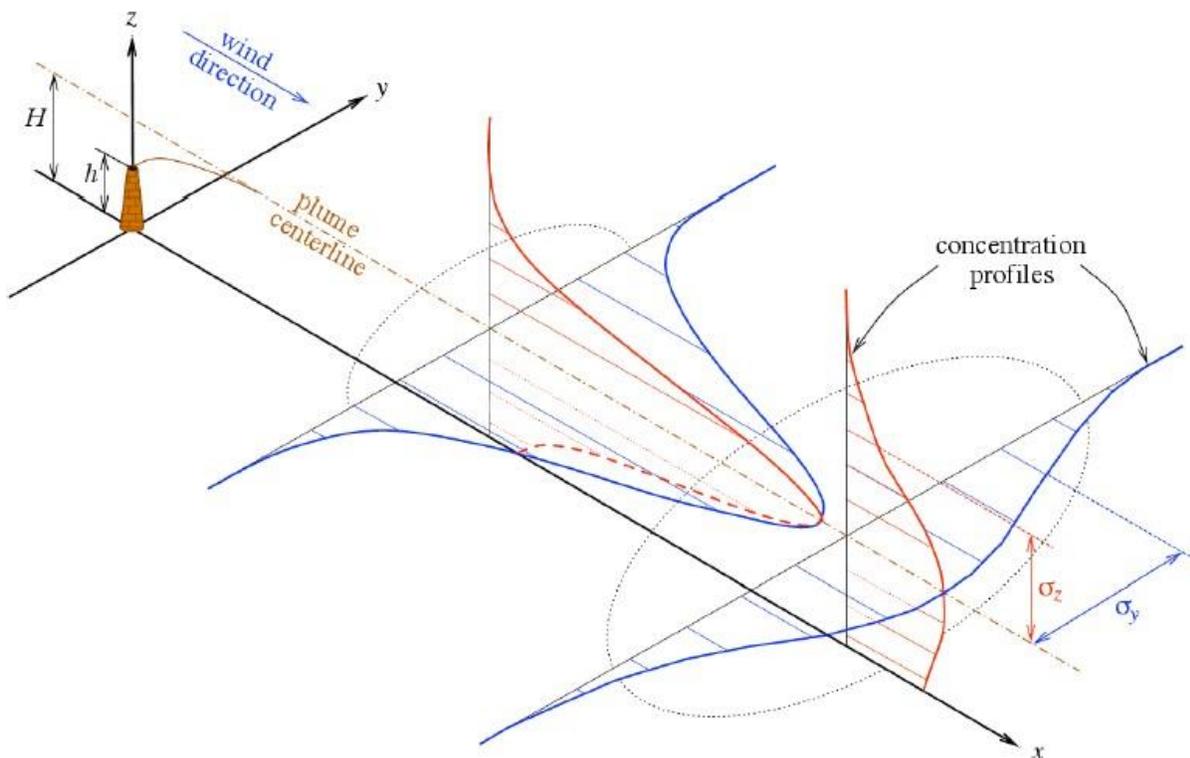


Figura 6 Modelo de Gauss

3.1.3 Análisis de la concentración en puntos claves de la pluma

Un primer escenario para considerar, son los puntos a nivel del suelo, estos casos son buenos para comenzar pues para encontrar los puntos solo se deben ajustar las coordenadas a conveniencia.

Concentración a nivel del suelo:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{u\pi \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{H^2}{\sigma_z^2}}$$

Concentración de la línea central a nivel del suelo:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{u\pi \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}}$$

Concentración máxima a nivel de suelo:

$$C_{max} = \frac{2Q}{euH^2\pi} \frac{\sigma_z}{\sigma_y}$$

3.2 Construcción del modelo de Gauss optimo

Las diversas correcciones del modelo pueden ir con relación a distintos parámetros de la ecuación original. Y son pertinentes en determinados casos de aplicación, para conseguir un modelado representativo de las condiciones del área de estudio.

Las diferencias radican principalmente en los siguientes parámetros:

- i) Expresión de σ_y y σ_z en función de la distancia y las condiciones de estabilidad.
- ii) El esquema de categorización de las condiciones de estabilidad y los parámetros utilizados como indicadores de estabilidad.
- iii) Altura de liberación para la que se diseñó el modelo.
- iv) Características del sitio donde se aplicará el modelo.

3.2.1 Condiciones de estabilidad y valores de los parámetros de dispersión

Una vez seleccionado el modelo óptimo para la dispersión, es necesario determinar los parámetros σ_y y σ_z , mediante la construcción de una estabilidad atmosférica. Esta construcción es una característica esencial de los modelos semi-empíricos, pues su construcción es fácilmente lograda a partir de observaciones meteorológicas aplicadas a esquemas previamente establecidos.

Estos esquemas datan de trabajos publicados por Gifford (1976) y Pasquill (1961), y proponen una clasificación de la A a la F según la velocidad del viento y datos atmosféricos del clima. Ofreciendo valores para σ_y y σ_z en base a estos datos.

Las tablas para la obtención de σ_y y σ_z se encuentran en la sección de anexos, sin embargo, se concluye que según estudios realizados por el departamento de estudios de seguridad de la CCHEN, el sistema atmosférico de la zona donde se emplaza el ciclón CEN La Reina tiene categoría B, es decir, Moderadamente inestable, lo que se traduce en los siguientes valores para los coeficientes de dispersión (Sepúlveda 2017).

3.2.2 Efectos de la presencia de estructuras en los coeficientes de dispersión

Los flujos de aire alrededor de las edificaciones son muy complejos y se han realizado diversos estudios al respecto, sin embargo, en lo que a este estudio se refiere, se tratarán las siguientes consideraciones:

Aproximación de la concentración de la pluma en torno a las dimensiones del edificio u obstáculo corrigiendo sus coeficientes de dispersión. (Cagnetti, 1980)

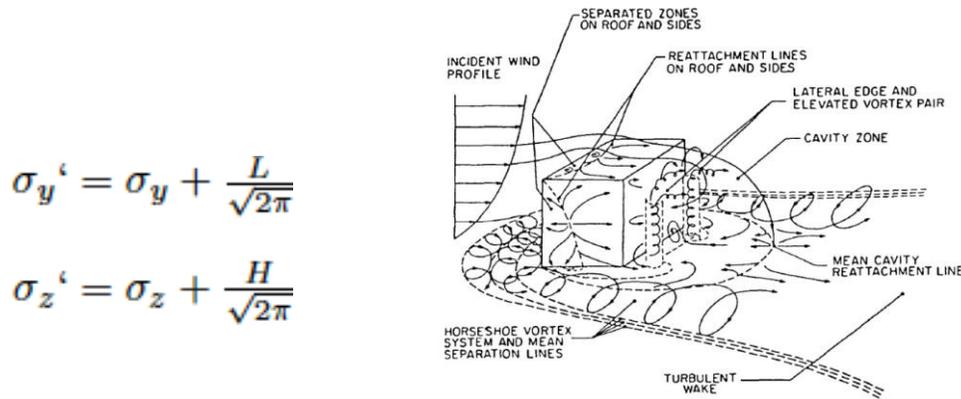


Figura 7 Variabilidad por estructuras (IAEA, TECDOC 379)

Donde L y H son las dimensiones horizontales y verticales del edificio u obstáculo respectivamente. Estos valores de los coeficientes de dispersión se aplicarán al cálculo de las concentraciones en distintos puntos de las vecindades de la chimenea según la distancia entre el punto de emisión y el punto de estudio, considerando la corrección de la concentración según los obstáculos cercanos (edificios, árboles y terreno irregular)

3.3 Corrección aplicada para dosis efectiva

Finalmente, para modelar satisfactoriamente el comportamiento de una columna de gas compuesta de material radioactivo, se debe aplicar una última corrección al modelo de Gauss original. Esta corrección se construye a partir de cambios en los parámetros de entrada de caudal y el valor final obtenido, sea dosis efectiva.

3.3.1 Análisis Dimensional

Consideramos dos definiciones para el valor final, que típicamente se espera que sea eng/m^3 como cualquier modelo de Gauss de dispersión, sin embargo al tratarse de material radioactivo, se espera obtener un parámetro de dosis efectiva comprometida en un intervalo de tiempo, es decir, E_c expresado en $\text{uSv}^{14}/\text{año}$, por tanto, E_c se relaciona con las concentraciones de salida (C_{ch}) y la concentración final en el punto de estudio (C_{gc}), a través de las siguientes ecuaciones :

Construcción dimensional del parámetro de dosis efectiva

Es posible obtener una ecuación que describa la dosis efectiva comprometida en función de un análisis dimensional como sigue:

Se sabe que E_c se expresa en $\text{Sv}/\text{año}$ y que además dependerá de la cantidad de sustancia radioactiva a la que se exponga el individuo por lo que primeramente se puede afirmar que E_c es directamente proporcional con la concentración en el punto de estudio C_{gc} , tal que:

$$E_c \left[\frac{\text{Sv}}{\text{a}} \right] = C_{gc} \left[\frac{\text{Beq}}{\text{m}^3} \right] k$$

Luego, la propagación del contaminante atmosférico es por aire (atmosférica), esto implica que la incorporación al organismo se hace por vía oral, por lo que E_c también es directamente proporcional con el caudal respiratorio (Q_r) del individuo en estudio, por lo tanto:

$$E_c \left[\frac{\text{Sv}}{\text{a}} \right] = C_{gc} \left[\frac{\text{Beq}}{\text{m}^3} \right] Q_r \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] k$$

14

Sievert (Sv): Es una medida del efecto sobre la salud de bajos niveles de radiación ionizante en el cuerpo humano. (Operational Quantities for External Radiation Exposure, Shortcomings and Alternative Options), G. Dietze, D. T. Bartlett, N.E. Hertel, given at IRPA 2012, Glasgow, Scotland. May 2012

Además, el proceso descrito se desarrolla en un intervalo de tiempo determinado a conveniencia del estudio y las mediciones asociadas, conocido como tiempo de exposición (T_e), y el periodo mas ampliamente utilizado es horas al año (UNSC 2008).

$$E_c\left[\frac{Sv}{a}\right] = C_{gc}\left[\frac{Beq}{m^3}\right] Q_r\left[\frac{m^3}{h}\right] T_e\left[\frac{h}{a}\right] k$$

Finalmente, se aplica el coeficiente dosimétrico (h_g) asociado a cada radioisótopo, y que corresponde a una constante de dosis efectiva por unidad de incorporación por inhalación, por lo tanto será expresado en Sv/Beq. Se obtiene:

$$E_c\left[\frac{Sv}{a}\right] = C_{gc}\left[\frac{Beq}{m^3}\right] Q_r\left[\frac{m^3}{h}\right] T_e\left[\frac{h}{a}\right] h_g\left[\frac{Sv}{Beq}\right]$$

Dimensionalmente:

$$E_c\left[\frac{Sv}{a}\right] = \left[\frac{Beq \ m^3 \ h \ Sv}{m^3 \ h \ a \ Beq}\right]$$

3.3.2 Corrección de modelo de Gauss para dosis efectiva

La forma de obtener C_{gc} surge de una simplificación del modelo de Gauss, que aplica la más pura definición de dispersión, es decir una concentración inicial C_{ch} disuelta en el espacio por un factor de dilución F_d :

$$C_{(x,y,z)} = Q F_d$$

$$C_{gc} = C_{ch} F_d$$

Considerando que, C_{gc} corresponde a la concentración final en el área de estudio, podemos decir que C_{gc} depende de $C(x,y,z)$, con x,y,z coordenadas del área de estudio.

$$C_{gc} = C_{ch} \frac{C_{(x,y,z)}}{Q}$$

Donde el factor de dilución corresponde a:

$$F_d = \frac{\left[e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \right] \left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} \right]}{2 u \pi \sigma_y \sigma_z}$$

Análogamente, la expresión de Gauss de dispersión:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2 u \pi \sigma_y \sigma_z} \left[e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \right] \left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} \right]$$

Luego, Cch expresada en Beq/m³, corresponde a la derivada del número de átomos radioactivos N en el tiempo. Y naturalmente la masa o cantidad de sustancia es una expresión de la cantidad de átomos. Construimos Cch en función de Q para reemplazarlas entre sí: Primeramente sabemos que la radiactividad

$$A = -\frac{dN}{dt} = \frac{\ln 2}{t_{med}} N$$

Sea:

$$N = -\frac{m}{M} N_a$$

Con una masa m de un isótopo de masa molar M, el caudal de salida en g/s tendrá una actividad

asociada en Beq/s según la relación anterior.

Así, si el modelo de gauss entrega una relación Caudal - Concentración final:

$$Q\left[\frac{g}{s}\right] \implies -C_{(x,y,z)}\left[\frac{g}{m^3}\right]$$

Si se corrige el parámetro de caudal de salida por actividad asociada a la masa, es decir radiactividad del caudal de salida:

$$\left[A_{(Q)}\left[\frac{Beq}{s}\right] \implies C_{(ch)}\left[\frac{Beq}{m^3}\right] \right]$$

Finalmente:

$$\left[Q_{salida}\left[\frac{g}{s}\right] \implies C_{(ch)}\left[\frac{Beq}{m^3}\right] \right]$$

Se obtiene como corrección del modelo de Gauss:

$$E_c = \frac{C_{ch}}{2 u \pi \sigma_y \sigma_z} (h_g Q_r T_e) \left[e^{-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}} \right] \left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2 \sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2 \sigma_z^2}} \right]$$

Es esta última corrección presenta el modelo que este estudio propone para obtener de forma efectiva la dosis absorbida en función de la dispersión atmosférica de un contaminante radioactivo. Esto da pie para el análisis de casos de estudio en las vecindades del ciclotrón ubicado en el Centro de estudios Nucleares de La Reina, Santiago, RM. La aplicación del modelo anteriormente propuesto en los casos de estudio fungirán como los principales resultados de este trabajo, pues se demostrara su aplicabilidad en este y otros posibles escenarios de operación.

3.3.3 Aplicación del modelo a la operación del ciclotrón de CEN La Reina

Se revisarán los parámetros y características de la operación normal¹⁵ del ciclotrón emplazado en el Centro de Estudios Nucleares La Reina. Este acelerador produce flúor 18 residual en forma de gas que es liberado a la atmósfera, se tendrán en cuenta las condiciones locales según se ha descrito durante este trabajo a fin de determinar la dosis efectiva comprometida incorporada por inhalación (E_c) para distintas personas ubicadas estratégicamente según su ocupación.

Grupos de estudio

Para la aplicación del modelo propuesto, se consideraran 4 casos de personas de referencia que se encuentran a nivel del piso ($z=0$) expuestas a la columna de gas de Flúor 18 emitida desde la chimenea del ciclotrón.

Persona de referencia: se define como una persona entre 20 y 30 años, que pesa 70 kg, mide 170 cm de altura. El parámetro a considerar es la altura, ya que será clave para la determinación de la concentración a la que se expondrá cada persona. (datos oficiales, OMS)

Los grupos de estudio para el caso del ciclotrón del CEN La Reina son los siguientes:

Funcionario de mantenimiento (critico): G1
Funcionario de mantenimiento (normal): G2
Funcionario ala Norte: G3
Publico vivienda cercana: G4

¹⁵ Operación normal se refiere a producción con estándares de rutina, no considera accidentes ni eventos anómalos (FORO, 2015)

3.3.4 Área de estudio

Funcionario de mantenimiento crítico: corresponde a un funcionario de mantenimiento ubicado a 1 metro del punto de emisión de flúor 18, con caudal respiratorio alto y durante 240 días al año, con bajas concentraciones en chimenea. Debido a que desempeña su trabajo muy cerca de la chimenea se le otorga el carácter crítico.



Ilustración 7 Vista aérea CEN La Reina (Elaboración propia, 2022)

Funcionario de mantenimiento normal: corresponde a un funcionario de mantenimiento ubicado a 10 metros del punto de emisión con concentraciones media- bajas de flúor en la chimenea por 240 días al año. Además, su caudal respiratorio es medio-alto.

Funcionario ala norte corresponde: a un funcionario administrativo, por lo que su caudal respiratorio es bajo ya que se asume que no realiza grandes esfuerzos físicos. La vista aérea de la zona se encuentra en la sección de anexos.

Publico en viviendas cercana: corresponde a personas de la sociedad o público general que viven en asentamientos cercanos a las instalaciones de estudio, es decir a 600 metros. Se considero una ventilación asociada a las actividades diarias de las personas en sus hogares; ejercicio liviano, pesado, reposo y mientras duermen. La ubicación de estas viviendas se encuentra detallada en la sección de anexos.



Ilustración 8 Vista aérea CEN La Reina (Elaboración propia, 2022)

3.3.5 Parámetros de entrada

Los datos empíricos y los casos de estudio fueron presentados por el departamento de seguridad nuclear (DISNR) de la CCHEN en conjunto con el departamento de metrología de la misma institución.

Caudal de salida de la chimenea Q

Para este estudio se definió una condición de operación estándar, por lo que el caudal de salida es de 636111.1 g/s equivalente a 2290 m²/h

Coeficientes de dispersión σ_y σ_z

Como se revisó previamente, los valores de σ_y σ_z obtenidos empíricamente están adecuados a las edificaciones y obstáculos como casas, árboles o edificios, que afectan la dispersión hasta cada punto de estudio.

La metrología asociada a la obtención de estos datos se revisará con más detalle en los anexos, sin embargo vale la pena comentar que son producto de un proceso semi-empírico que relaciona la distribución espacial (x,y,z) de parámetros meteorológicos/atmosféricos.

En definitiva, se obtuvieron los valores para σ_y y σ_z relativos a 6 distancias desde el punto de emisión hasta el punto de estudio. Estas distancias corresponden a los puntos donde se ubican grupos de personas que están expuestas a la nube de flúor 18 que sale desde el ciclotrón.

Además, se generó el factor de dilución asociado a cada par de coeficientes para el cálculo aplicado del modelo, esto considerando una velocidad del viento (u) axial en x y con valor de 1[m/s].

Con:

$$F_d = 2u\pi \sigma_y \sigma_z$$

Distancia (m)	σ_y	σ_z	F_d
1	3,24E-01	3,34E+00	6,8E+00
10	2,54E+00	3,84E+00	6,1E+01
20	4,72E+00	4,49E+00	1,3E+02
50	1,07E+01	6,71E+00	4,5E+02
100	1,99E+01	1,09E+01	1,4E+03
600	9,88E+01	6,26E+01	3,9E+04

Tabla 1 Tabla de condiciones de estabilidad atmosférica

Tiempo de exposición y ventilación de las personas

El tiempo de exposición considerado para cada grupo también es un dato proporcionado por la CCHEN, y esta asociado a condiciones de operación y parámetros estadísticos de cada grupo de personas. El parámetro final se trabaja en horas al año, y para obtenerlo se usaron valores de referencia relacionados al tiempo empleado en actividades (Sepúlveda (et.al), 2017).

De la misma forma, se asocia un caudal respiratorio o ventilación para cada grupo de estudio, también obtenido desde la literatura (Zuurbier, 2009). Dando como resultado una relación entre el tiempo de exposición y la ventilación relativos a cada grupo.

Actividad	Ventilación [m ³ /h]
Ejercicio Pesado	3
Ejercicio Liviano	1,5
Reposo	0,54
Dormir	0,45

Tabla 2 Tabla de ventilación asociada a actividad física (Sepúlveda, 2017)

Actividad	G1	G2	G3	G4
Ejercicio Pesado	2,5 h	2.5 h	0 h	0,25 h
Ejercicio Liviano	0 h	5.5 h	5.5 h	9,75 h
Reposo	0 h	0 h	2,5 h	6 h
Dormir	0 h	0 h	0 h	8 h
Total	2,5 h	8 h	8 h	24 h

Tabla 3 Tabla de tiempo en horas asociadas a la actividad física (Sepúlveda, 2017).

Se obtiene el parámetro Caudal Respiratorio (Q_r), como un promedio ponderado de la ventilación en el tiempo de cada actividad.

$$Q_r = \frac{\sum(V_{act} T_{act})}{T_{total}}$$

Grupo de Control	Q_r [m ³ /h]
G1	3
G2	1,97
G3	1,2
G4	0,93

Tabla 4 Tabla de ventilación promedio por hora según actividad física (Sepúlveda, 2017).

Concentración de contaminante (Flúor 18) en la chimenea

Este es el último parámetro que debe considerarse para el cálculo de dosis efectiva comprometida y corresponde a la concentración asociada a la masa del caudal de salida. Esta concentración en función de la masa se obtiene teóricamente como se detalla en el punto 3.6, sin embargo el valor presentado corresponde al valor medido empíricamente por un instrumento Además, cada concentración se relaciona con condiciones de operación relativas a las características de cada grupo.

Grupo de estudio	C_{ch} [Beq/m ³]
G1	7,00E+03
G2	3,00E+04
G3	1,07E+05
G4	1,03E+05

Tabla 5 Tabla de concentración en chimenea de Flúor 18 (Sepúlveda, 2017)

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Se aplicarán los parámetros descritos anteriormente en el modelo de Gauss corregido para obtener dosis efectiva. El coeficiente dosimétrico h_g es propio de cada radioisótopo, en este caso, el coeficiente del flúor 18 es: $5,40E-11$ [Sv/Beq] y este se empleará en cada caso para obtener la dosis final a partir de una concentración en bequerel.

Como se revisó anteriormente, se empleará el modelo de Gauss de dispersión atmosférica de contaminantes, pero aplicando la corrección que se desarrolló en el punto 3.6 que implica la obtención de una dosis efectiva E_c a partir de una concentración inicial C_{ch} , esta medida se realiza con un monitor de pila de positrones Thermo Scientific FHT3511, mediante detección por coincidencias.

Para comprobar la efectividad del modelo, se diseñó el conjunto de datos a utilizar para que la dosis efectiva E_c sea menor o igual a $0,1$ mSv/a en todos los casos, de esta manera se demostró que al variar los parámetros se obtiene la medida esperada en distintos casos. El valor de $0,1$ mSv/a es la meta que dispuso el DISNR para la dosis de flúor 18 provenientes del ciclotrón.

A continuación, se aplicara la ecuación para cada caso:

$$E_c = \frac{C_{ch}}{2 u \pi \sigma_y \sigma_z} (h_g Q_r T_e) \left[e^{-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}} \right] \left[e^{-\frac{(z+H)^2}{2 \sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z-H)^2}{2 \sigma_z^2}} \right]$$

Caso G1: Funcionario de mantenimiento crítico

El caso G1 corresponde al de un funcionario de mantenimiento crítico que se encuentra trabajando en las cercanías de la chimenea, a 1 metro de la salida del contaminante. Se establece que este trabajador realiza este labor de forma periódica en el año, por un total de 600 horas/año. Por las condiciones de operación, este trabajador presenta un caudal respiratorio alto, ya que realiza actividad física durante las mantenciones. El caudal respiratorio Q_r es de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ asociado a ejercicio pesado. Así mismo, se estudio la concentración inicial de carga contaminante en el reactor, presentada en Beq/m^3 , y dado que el caso de estudio es el de un funcionario de mantenimiento, el reactor se encuentra con una configuración tal que la carga de contaminante sea la mínima posible. Finalmente dado que el funcionario se encuentra cerca del punto de emisión, el factor de dilución es pequeño, dado que la pluma se dispersa poco en espacio hasta el funcionario.

A continuación, se presenta una tabla que reúne todas las variables que se considerarán en el cálculo de la dosis efectiva incorporada por inhalación E_c , definida en términos de la concentración final en el espacio.

Tabla 6 Tabla de parámetros G1 (Elaboración propia, 2022).

GRUPO G1	
Parámetro	Valor
Caudal se salida [Q]	636111.1 g/s
Tiempo de exposición [Te]	600 h/a
Caudal respiratorio [Qr]	$3.0 \text{ m}^3/\text{h}$
Factor del flúor 18 [hg]	$5.4 \text{ E}-11 \text{ Sv/Beq}$
Concentración en chimenea [Cch]	$7 \text{ E}03 \text{ Beq}/\text{m}^3$
σ_y en Km	$3.4 \text{ E}-01$
σ_z en Km	$3.34 \text{ E} 00$
Distancia del sujeto	1 m
Altura efectiva de la chimenea [H]	10 m
Velocidad promedio del viento [u]	1 m/s

Se definen los parámetros de control a partir de gauss como sigue,

1-. $Q = 636111.1 \text{ g/s}$ equivalentes a $2290 \text{ m}^3/\text{h}$

2-. $C(x,y,z) = 36.46 \text{ g}/\text{m}^3$

3-. $C_{ch} = 7 \text{ E}04 \text{ Beq}/\text{m}^3$

Luego obtenemos C_{gc} a partir de la siguiente relación

$$C_{gc} = C_{ch} \frac{C_{(x,y,z)}}{Q}$$

$$C_{gc} = 111.449 \text{ Beq/m}^3$$

Finalmente se aplica el factor relativo a la dosis efectiva para obtener E_c

$$E_c = C_{gc} (Q_r T_e h_g)$$

$$E_c = 0,011 \text{ uSv/año}$$

Modelo de pluma Gaussiana de dispersión de contaminantes

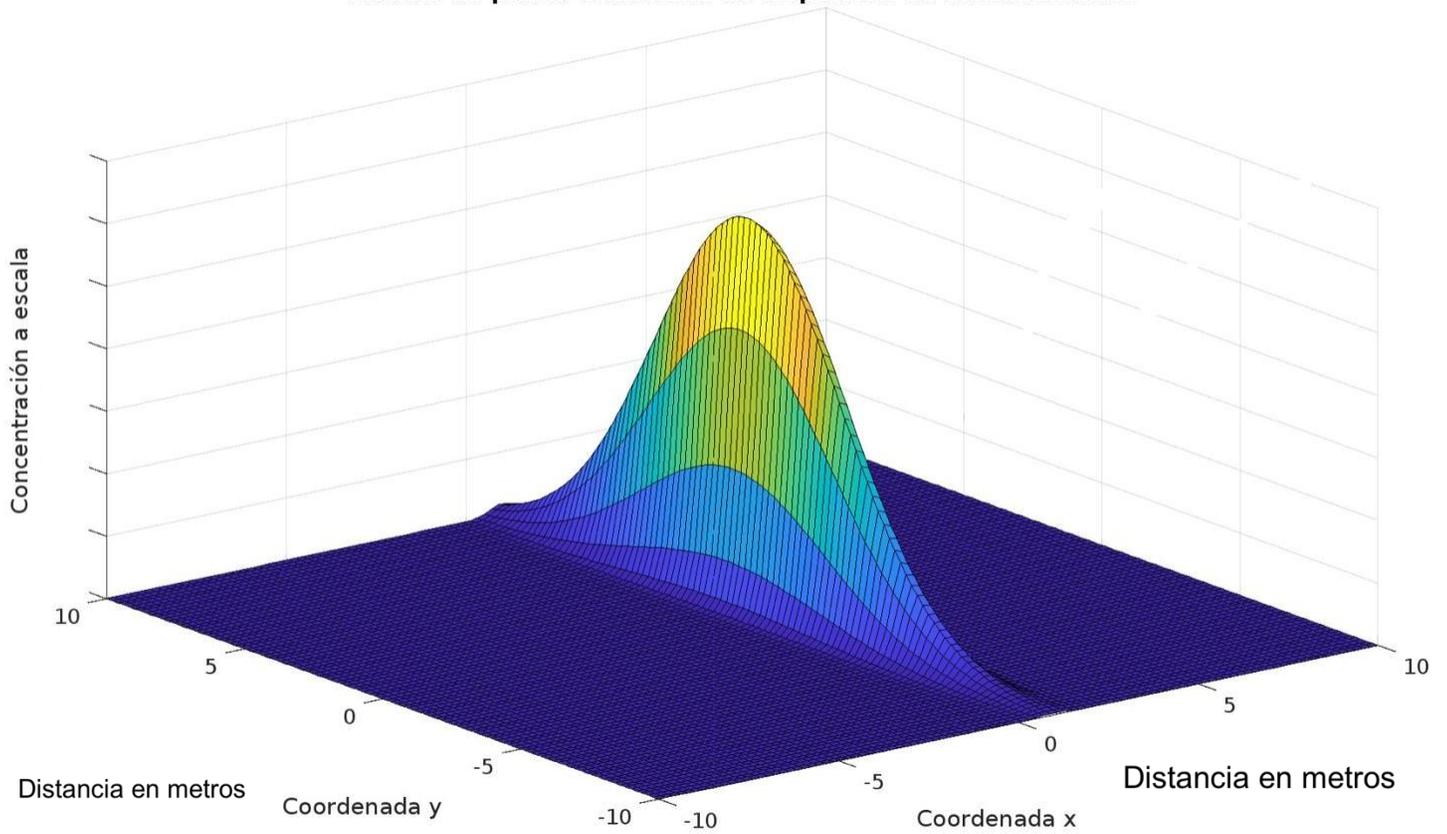


Figura 8 Modelo Matlab de la concentración de contaminante a la que se expone el G1 (Elaboración propia, 2022)

Caso G2: Funcionario de mantenimiento Normal

El caso G2 corresponde al de un funcionario de mantenimiento que se encuentra trabajando en las cercanías de la chimenea, a 10 metros de la salida del contaminante. Se establece que este trabajador realiza este labor de forma periódica en el año, por un total de 1920 horas/año. Por las condiciones de operación, este trabajador presenta un caudal respiratorio relativamente alto, ya que realiza actividad física durante las mantenciones. El caudal respiratorio Q_r es de $1,97 \text{ m}^3/\text{h}$ asociado a ejercicio pesado. Así mismo, se estudio la concentración inicial de carga contaminante en el reactor, presentada en Beq/m^3 , y dado que el caso de estudio es el de un funcionario de mantenimiento, el reactor se encuentra operando con una configuración tal que la carga de contaminante permita la realización de sus labores.

Finalmente dado que el funcionario se encuentra cerca del punto de emisión, el factor de dilución es pequeño, dado que la pluma se dispersa poco en espacio hasta el funcionario.

A continuación se presenta una tabla que reúne todas las variables que se considerarán en el calculo de la dosis efectiva incorporada por inhalación E_c , definida en términos de la concentración final en el espacio.

Tabla 7 Tabla de parámetros G2 (Elaboración propia, 2022).

GRUPO G2	
Parámetro	Valor
Caudal se salida [Q]	636111.6 g/s
Tiempo de exposición[Te]	1920 h/a
Caudal respiratorio [Qr]	1.97 m^3/h
Factor del flúor 18 [hg]	5.4 E-11 Sv/Beq
Concentración en chimenea [Cch]	3.00 E4 Beq/m^3
σ_y en Km	2.54 E 00
σ_z en Km	3.84 E 00
Distancia del sujeto	10 m
Altura efectiva de la chimenea [H]	10 m
Velocidad promedio del viento [u]	1 m/s

Se definen los parámetros de control a partir de gauss como sigue,

1-. $Q = 636111.1 \text{ g/s}$ equivalentes a $2290 \text{ m}^3/\text{h}$

2-. $C(x,y,z) = 0,4755 \text{ g}/\text{m}^3$

3-. $C_{ch} = 3,0 \text{ E4 Beq}/\text{m}^3$

Luego obtenemos C_{gc} a partir de la siguiente relación

$$C_{gc} = C_{ch} \frac{C_{(x,y,z)}}{Q}$$

$C_{gc} = 6.229 \text{ Beq}/\text{m}^3$

Finalmente se aplica el factor relativo a la dosis efectiva para obtener E_c

$$\sqrt{E_c} = C_{gc} (Q_r T_e h_g)$$

$E_c = 0,013 \text{ uSv/año}$

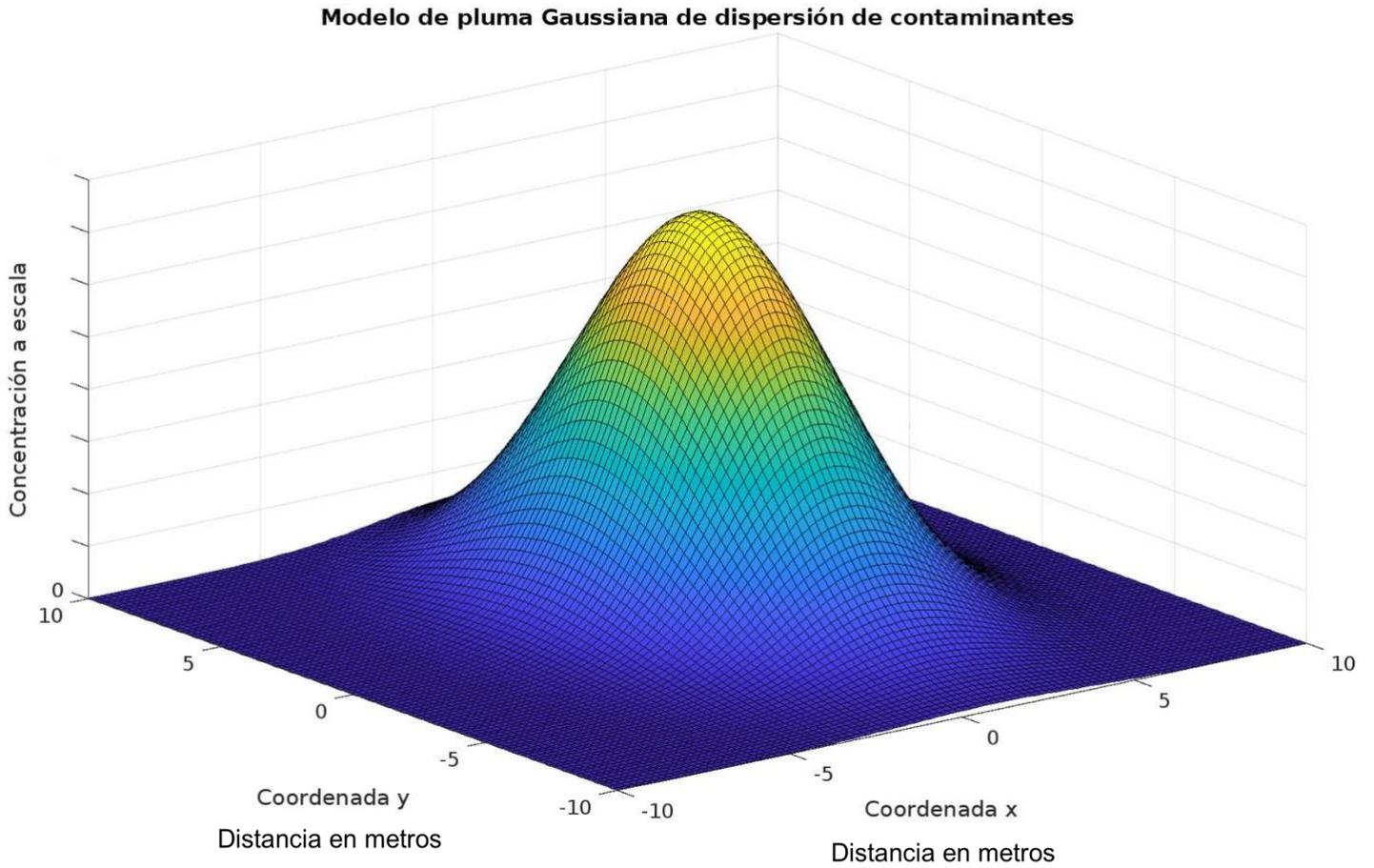


Figura 9 Modelo Matlab de la concentración de contaminante a la que se expone el grupo G2 (Elaboración propia, 2022)

Caso G3: Funcionario Administrativo Ala Norte

El caso G3 corresponde al de un funcionario de administrativo que se encuentra trabajando en un edificio de oficinas a 20 metros de la salida del contaminante. Se establece que este trabajador realiza este labor de forma periódica en el año, por un total de 1920 horas/año. Por las condiciones de operación, este trabajador presenta un caudal respiratorio bajo, ya que no realiza actividad física durante las mantenciones. El caudal respiratorio Q_r es de 1,2 m³/h asociado al estado de reposo. Así mismo, se estudio la concentración inicial de carga contaminante en el reactor, presentada en Beq/m³, y dado que el caso de estudio es el de un funcionario que no participa en la operación directa, el reactor se encuentra operando en configuración normal. Finalmente notamos como al estar mas alejado del punto de emisión, el factor de dilución es mayor, dado que la pluma se dispersa mas en espacio hasta llegar al funcionario.

A continuación se presenta una tabla que reúne todas las variables que se considerarán en el calculo de la dosis efectiva incorporada por inhalación E_c , definida en términos de la concentración final en el espacio.

Tabla 8 Tabla de parámetros G3 (Elaboración propia, 2022).

GRUPO G3	
Parámetro	Valor
Caudal se salida [Q]	636111.6 g/s
Tiempo de exposición[Te]	1920 h/a
Caudal respiratorio [Qr]	1.2 m ³ /h
Factor del flúor 18 [hg]	5.4 E-11 Sv/Beq
Concentración en chimenea [Cch]	1.07 E5 Beq/m ³
σ_y en Km	4.72 E 00
σ_z en Km	4.49 E 00
Distancia del sujeto	20 m
Altura efectiva de la chimenea [H]	20 m
Velocidad promedio del viento [u]	1 m/s

Se definen los parámetros de control a partir de gauss como sigue,

1-. $Q = 636111.1 \text{ g/s}$ equivalentes a 2290 m³/h

2-. $C(x,y,z) = 0.129 \text{ g/m}^3$

3-. $C_{ch} = 3,0 \text{ E4 beq/g}$

Luego obtenemos C_{gc} a partir de la siguiente relación

$$C_{gc} = C_{ch} \frac{C_{(x,y,z)}}{Q}$$

$C_{gc} = 6.03 \text{ Beq/m}^3$

Finalmente se aplica el factor relativo a la dosis efectiva para obtener E_c

$$\sqrt{E_c} = C_{gc} (Q_r T_e h_g)$$

$E_c = 0,0008 \text{ uSv/año}$

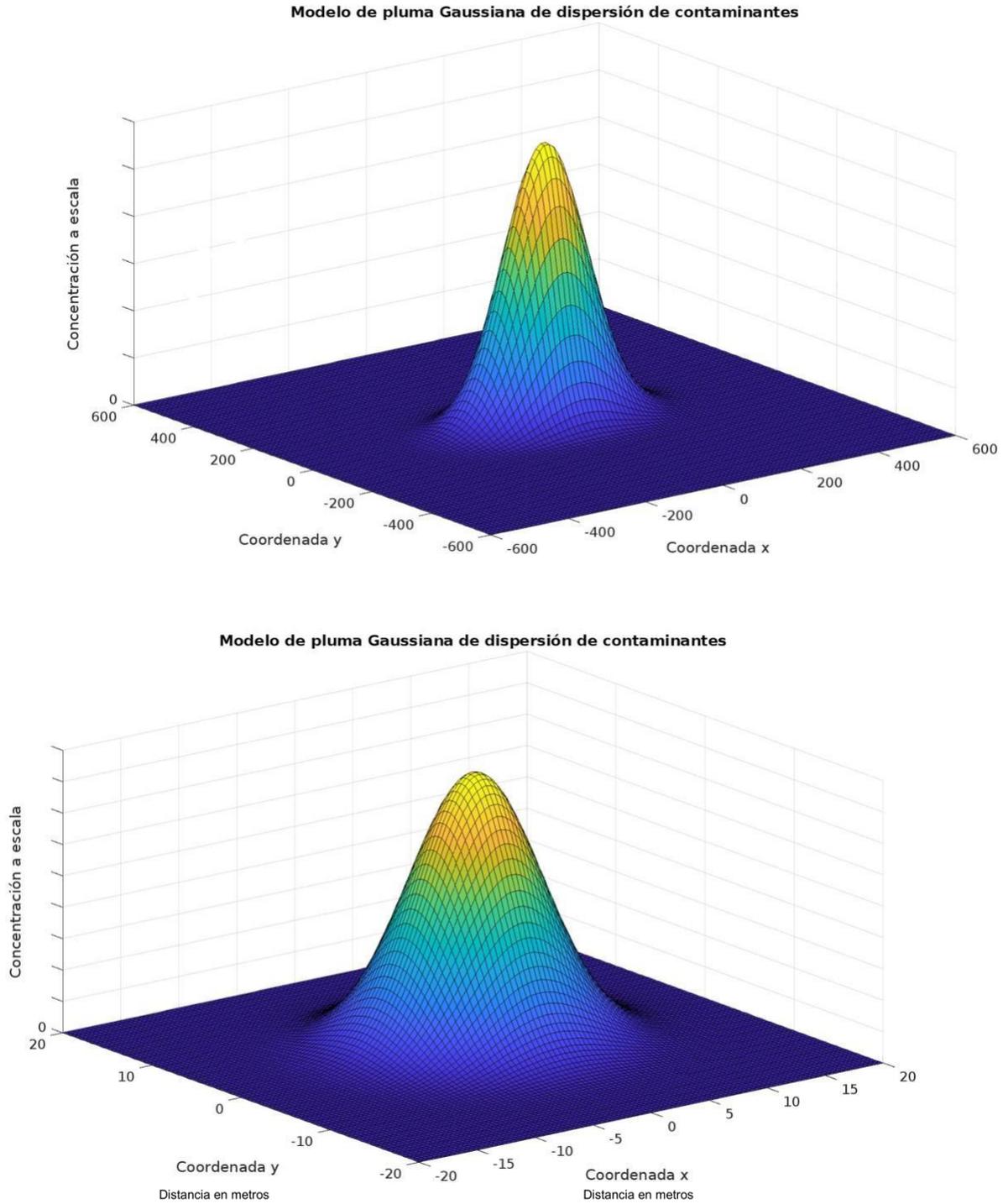


Figura 10 Modelo Matlab de la concentración de contaminante a la que se expone el grupo G3 (Elaboración propia, 2022)

Caso G4: Publico en viviendas cercanas

El caso G4 corresponde al de personas que viven en asentamientos cercanos a las instalaciones del CEN. Se trata de una población a 600 metros de la salida del contaminante. Se establece que al vivir aquí estas personas pasan un promedio de 8760. El caudal respiratorio Q_r es de $0,93 \text{ m}^3/\text{h}$ asociado al promedio de actividades realizado en el hogar tales como ejercicio pesado y livianos, además de reposo y dormir. Así mismo, se estudio la concentración inicial de carga contaminante en el reactor, presentada en Beq/m^3 , y dado que el caso de estudio es el de una persona que no participa en la operación directa, el reactor se encuentra operando en configuración normal. Finalmente notamos como al estar mas alejado del punto de emisión, el factor de dilución es mayor, dado que la pluma se dispersa mas en espacio hasta llegar al funcionario.

A continuación se presenta una tabla que reúne todas las variables que se considerarán en el calculo de la dosis efectiva incorporada por inhalación E_c , definida en términos de la concentración final en el espacio.

Tabla 9 Tabla de parámetros G4 (Elaboración propia, 2022).

GRUPO G4	
Parámetro	Valor
Caudal se salida [Q]	636111.6 g/s
Tiempo de exposición[Te]	8760 h/a
Caudal respiratorio [Qr]	0,93 m^3/h
Factor del flúor 18 [hg]	5.4 E-11 Sv/Beq
Concentración en chimenea [Cch]	1,03 E5 Beq/m^3
σ_y en Km	9.88 E 00
σ_z en Km	6.26 E 00
Distancia del sujeto	600 m
Altura efectiva de la chimenea [H]	10 m
Velocidad promedio del viento [u]	1 m/s

Se definen los parámetros de control a partir de gauss como sigue,

1-. $Q = 636111.1 \text{ g/s}$ equivalentes a $2290 \text{ m}^3/\text{h}$

2-. $C(x,y,z) = 0 \text{ g}/\text{m}^3$

3-. $C_{ch} = 1.03 \text{ E}4 \text{ beq/g}$

Luego obtenemos C_{gc} a partir de la siguiente relación

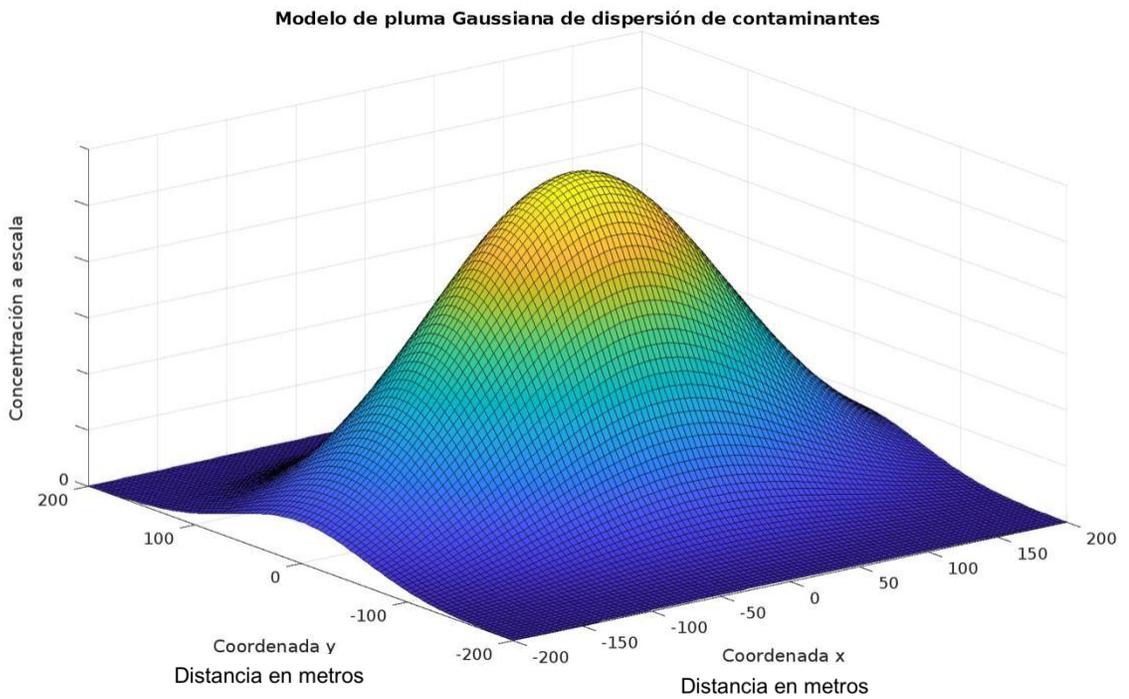
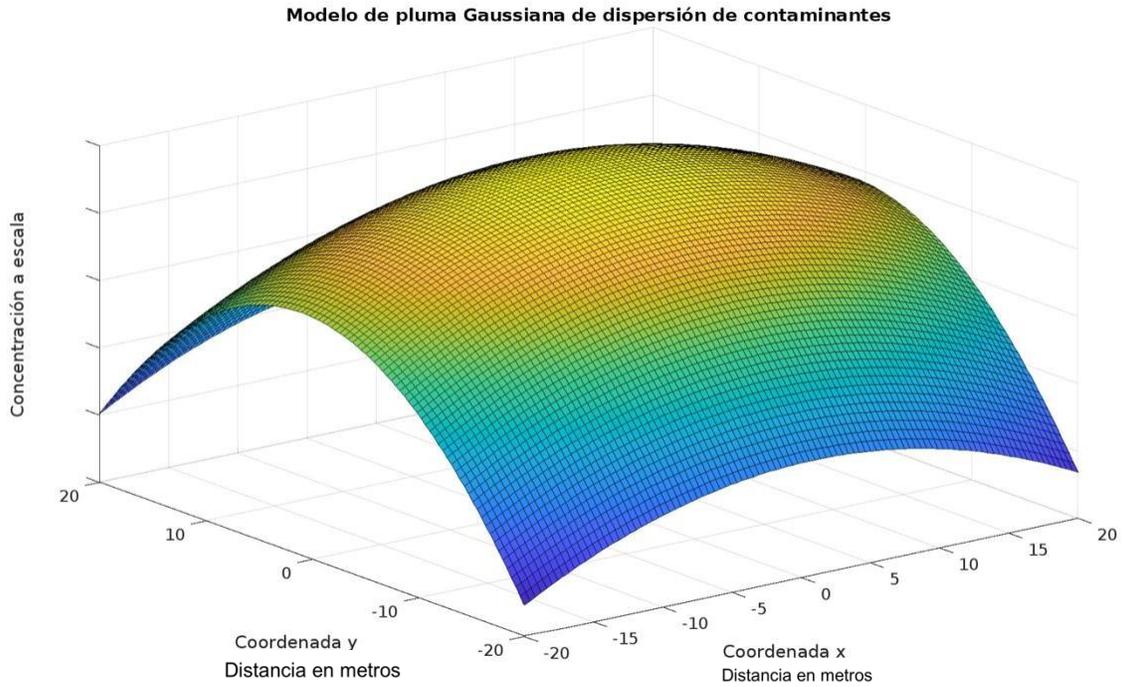
$$C_{gc} = C_{ch} \frac{C_{(x,y,z)}}{Q}$$

$C_{gc} = 0 \text{ Beq}/\text{m}^3$

Finalmente se aplica el factor relativo a la dosis efectiva para obtener E_c

$$\hat{E}_c = C_{gc} (Q_r T_e h_g)$$

$E_c = 0$ uSv/año



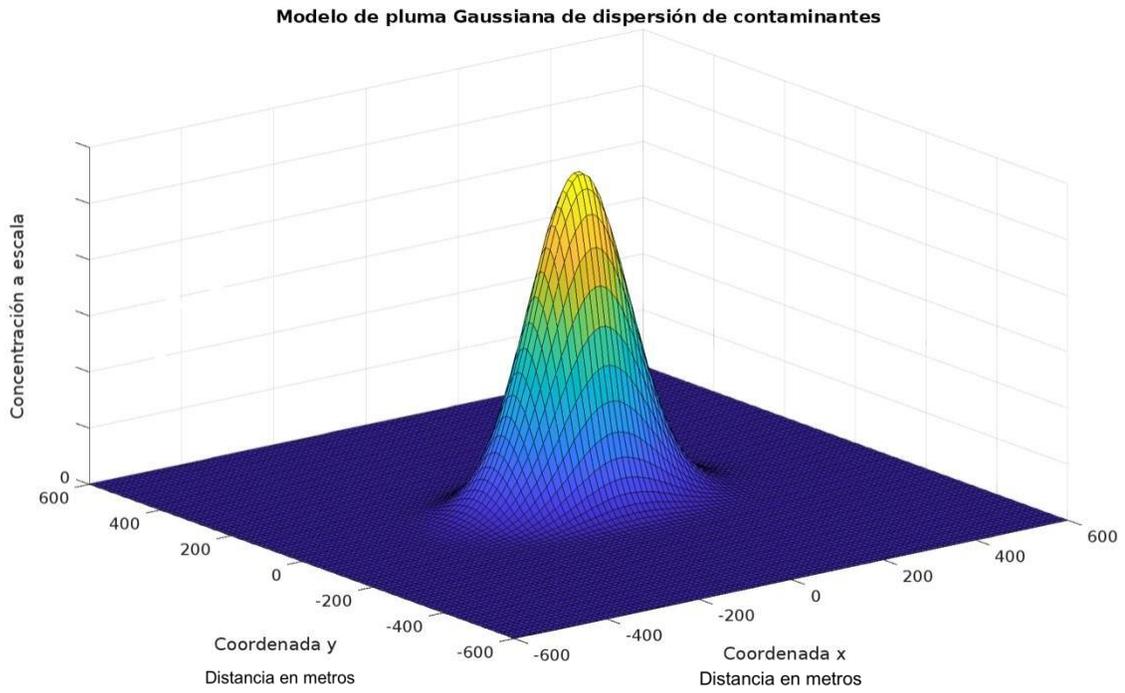


Figura 11 Modelo Matlab de la concentración de contaminante a la que se expone el grupo G3 (Elaboración propia, 2022)

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN

En el contexto de esta investigación, se abordan diversas consideraciones cruciales que pueden impactar los resultados y conclusiones del estudio. Se exploran posibles mejoras y fuentes de error que podrían influir en la calidad y validez de los datos obtenidos. Uno de los aspectos clave analizados es la utilización de una muestra inadecuada, lo que podría limitar la representatividad de la población estudiada. Además, se examina críticamente la metodología de recolección de datos, realizada por el centro de metrología del CEN, y se plantea la posibilidad de que ciertos errores puedan surgir debido a las fluctuaciones en las condiciones atmosféricas y locales que afectan los factores de dispersión. Estos aspectos son solo el inicio de un análisis exhaustivo de las distintas implicaciones y desafíos metodológicos que se deben enfrentar en esta investigación. Cada uno de estos aspectos pueden influir en la interpretación de los resultados y en la conclusión final del estudio.

Muestra inadecuada: La muestra utilizada en la investigación corresponde a los datos de una persona de referencia, que puede no ser perfectamente representativa de la población que se está estudiando. Sin embargo esta generalización permite realizar el estudio sin necesidad de realizar catastros y censos que retrasarían significativamente el proceso del estudio.

Métodos de recolección de datos: La compilación de los parámetros críticos es parte fundamental del estudio, y estuvo a cargo del centro de metrología del CEN. Es posible que, sobre todo los valores de los factores de dispersión tengan cierto porcentaje de error que radica en las fluctuaciones en las condiciones de la atmósfera y en las condiciones del escenario local.

- **Análisis de datos:** La base del modelo final es el modelo de Gauss que corresponde a una simplificación matemática limitada por sus propias variables. Los parámetros y condiciones se homologan el proceso estadístico para que la columna de aire se modele a partir de factores de dispersión. Este proceso no termina de considerar todas las posibles variables del caso y es una generalización de la situación real.
- **Marco teórico:** Si la tesis se basa en una teoría incorrecta o desactualizada, los resultados y conclusiones podrían ser cuestionables. Actualmente los modelos computacionales posiblemente entregan aproximaciones mas completas del problema. Sin embargo, también requieren un tratamiento mas exhaustivo de datos.
- **Falta de revisión por pares:** Los resultados tesis deben ser revisados por expertos, en distintas condiciones para confirmar o desmentir la aplicabilidad del modelo pues pueden pasar desapercibidos errores o debilidades en el trabajo, producto de sesgos propios de trabajar con un conjunto limitado de datos.
- **Contraste de resultados:** Complemento de aparatos de detección y modelos computacionales para comprobar empíricamente los resultados. También cambiar unidades de medida y recalcular con diferentes unidades para comprobar la independencia dimensional del modelo.
- Además, con los datos obtenidos de las dispersiones del contaminante, se puede establecer un radio de operación, tal que fuera de dicho radio los efectos de la radiación asociada a una descarga de flúor 18 realizada por el ciclotrón son

despreciables. Este radio de operación es el esperado para las condiciones de operación del centro, que delimita su perímetro en torno a esta distancia. Este radio es de 100 metros desde el punto de emisión, ya que más allá de los 100 metros, los valores de la dispersión se hacen 0 y por tanto no hay dosis asociada.

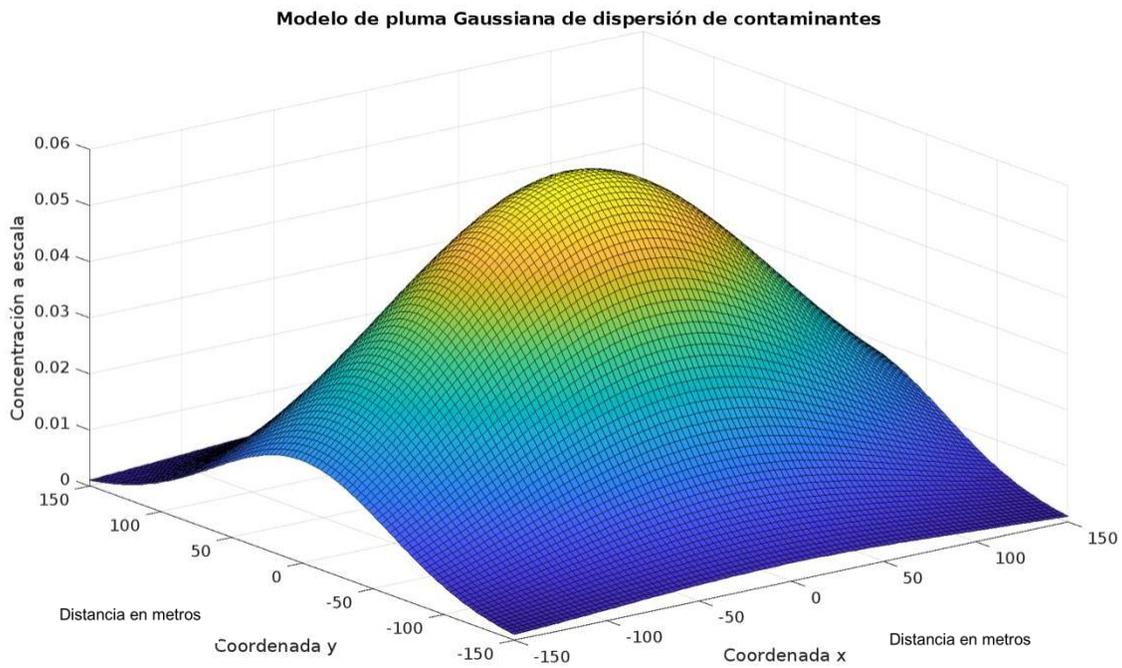
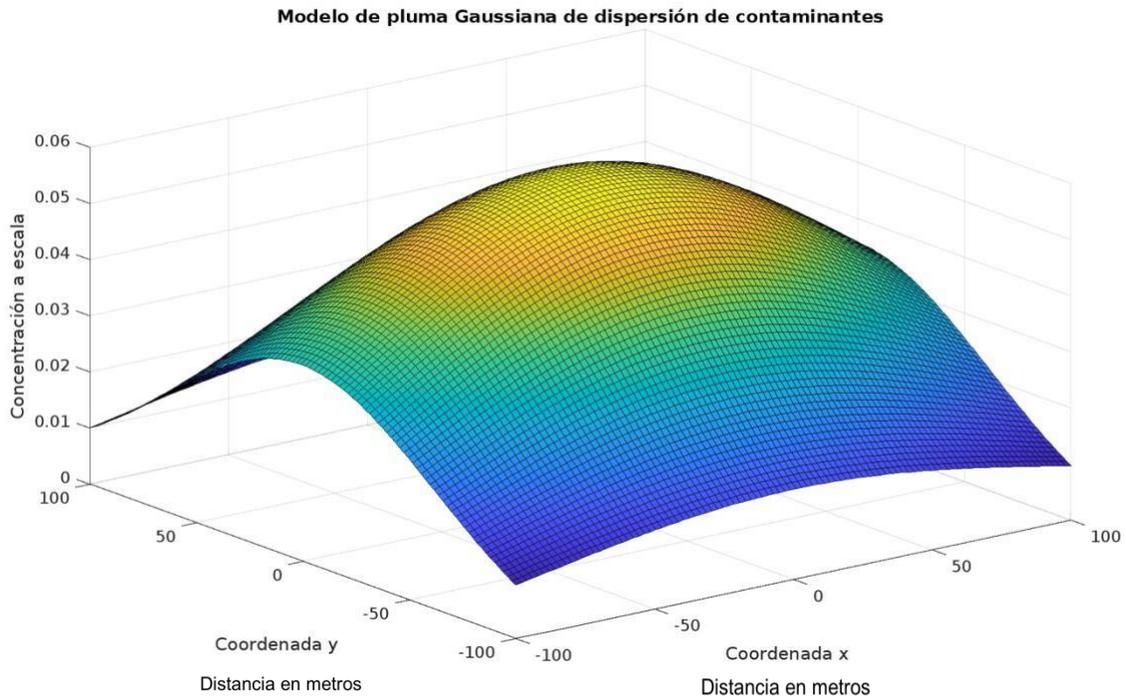


Figura 12 Modelo Matlab de la concentración de contaminante en el radio de control (Elaboración propia, 2022)

Como se puede observar, superando los 100 metros a la redonda, los valores de concentración tienden a 0, por lo que fuera de este radio no existen consecuencias radiológicas atribuibles a la emisión de flúor 18 en el ciclotrón.

Un próximo paso, en el proceso de este modelado, debe ser contrastar los valores teóricos del modelo, con resultados obtenidos empíricamente. Esta medición empírica que sirva como comprobación de los valores teóricos, debe hacerse directamente a personas que pertenezcan a los grupos de estudio detallados en la aplicación del modelo. Además, debe generarse esta medición, aislando la dosis de flúor 18 de las demás fuentes de radiación, a las que las personas se exponen normalmente.

Finalmente, la aplicabilidad de este modelo para otros escenarios con distintas condiciones meteorológicas, geográficas y operacionales depende exclusivamente de parametrizar correctamente estas características y se podrá obtener el valor esperado de forma satisfactoria.

En conclusión, este estudio ha puesto de relieve la importancia de considerar cuidadosamente diversas mejoras potenciales y fuentes de error que pueden surgir en la investigación científica. Se ha identificado que el uso de una muestra inadecuada puede afectar la representatividad de los resultados obtenidos, pero también se ha reconocido que esta generalización es una medida necesaria para optimizar el proceso del estudio. Asimismo, se ha señalado que la metodología de recolección de datos, a cargo del centro de metrología del CEN, puede estar sujeta a ciertos errores derivados de las variaciones en las condiciones atmosféricas y locales. El análisis estadístico basado en un modelo de Gauss ha demostrado ser una herramienta valiosa, pero también se ha destacado su limitación al no considerar todas las variables del caso, lo que podría afectar la precisión de los resultados. Es fundamental reconocer que el marco teórico empleado debe ser riguroso y actualizado para garantizar la fiabilidad de las conclusiones. Además, se ha subrayado la importancia de la revisión por pares como un proceso esencial para asegurar la integridad y validez del estudio. En este sentido, la utilización de aparatos de detección y modelos computacionales como complemento para contrastar los resultados empíricos se ha mostrado como una estrategia eficaz para fortalecer la robustez del análisis. En última instancia, este trabajo ha puesto de manifiesto la necesidad de abordar estas consideraciones metodológicas de manera rigurosa y reflexiva para obtener resultados más precisos y confiables en futuras investigaciones

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Los resultados del modelado fueron completamente satisfactorios, ya que se pudo estimar valor de dosis efectiva comprometida por inhalación, en función de condiciones iniciales de concentración en chimenea, coeficientes posicionales en el espacio, parámetros atmosféricos. La corrección propuesta en este trabajo de tesis para el modelo de Gauss es representativa de la situación que pretende describir. Además, según los valores obtenidos, la dosis efectiva que afecta a cada grupo de estudio está dentro de los rangos que permite la norma vigente a la fecha, en el reglamento de seguridad del Minsal, de 50uSv para trabajadores y 1 uSv para público en general.

Los valores obtenidos para cada grupo de control fueron los siguientes

- Ec G1: 0,011 uSv/año
- Ec G2: 0,013 uSv/año
- Ec G3: 0,0008 uSv/año
- Ec G4: 0 uSv/año

Para los casos G1 y G2, que corresponden a las personas que desempeñan sus labores más cerca del reactor, la dosis efectiva comprometida estuvo en el orden de los 0,01 uSv/año y siendola más alta de todos los grupos estudiados aun así supone una muy baja dosis para las personas, teniendo como referencia que una radiografía es 10 veces más potente con una dosis efectiva de 0,1 uSv y más aun teniendo en cuenta que la dosis asociada al flúor 18 es a lo largo de un año y la referencia de la radiografía es solo una vez.

En cuanto al caso G3, este supuso una medida tan baja, que se considera prácticamente despreciable, por lo que se puede concluir que la arquitectura y funcionamiento del reactor están pensados para que los contaminantes que emiten a la atmósfera no afecten a los funcionarios que desempeñan sus labores en el CEN. Así mismo, para el grupo G3 el valor de la concentración es 0, y por lo tanto la dosis efectiva en esa parte del espacio también es 0. Por lo tanto, también podemos concluir que el reactor y su funcionamiento no afectan de ninguna manera a las poblaciones cercanas.

De hecho, con los datos obtenidos de las dispersiones del contaminante, se puede establecer un radio de operación, tal que fuera de dicho radio los efectos de la radiación asociada a una descarga de flúor 18 realizada por el ciclotrón son despreciables. Este radio de operación es el esperado para las condiciones de operación del centro, que delimita su perímetro en torno a esta distancia. Este radio es de 100 metros desde el punto de emisión, ya que más allá de los 100 metros, los valores de la dispersión se hacen 0 y por tanto no hay dosis asociada.

CAPÍTULO 6 REFERENCIAS Y ANEXOS

6.1 Referencias

- Apsihon, H. M., Earnshaw, D., Goddard, A. J. H., & Wrigley, J. (1977). Trajectory analysis with particular reference to the 1957 Windscale Release. London, Imperial College of Science and Technology, Nuclear Power Section.
- Apsimon, H. M., & Goddard, A. J. H. (1984). Atmospheric transport of radioisotopes and the assessment of population doses on a European scale. CEC Luxembourg EUR-9128.
- Attix, F. H. (2004). Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. Wiley-VCH.
- Barker, C. D. (1982). A virtual source model for building wake dispersion in nuclear safety calculations (UK CEBG report TPRD/B/0072/N82).
- Briggs, G. A. (1975). Plume rise predictions. In Lectures on air pollution and environmental impact analyses, sponsored by the American Meteorological Society, Boston, MA, USA. Air Turbulence and Diffusion Laboratory Contribution, File No. 75/15.
- Brun, J., Hugon, J., & Le Quinio, R. (1974). Influence de la durée d'exposition sur l'évaluation des coefficients de diffusion atmosphérique. Physical Behaviour of Radioactive Contaminants in the Atmosphere (Vienna 1973), IAEA Vienna.
- Cagnetti, P., & Ferrara, V. (1980). A simple formula for estimating airborne concentrations downwind of buildings for discharges near ground level. Proc. of a Seminar on Radioactive Releases and Their Dispersion in the Atmosphere Following a Hypothetical Reactor Accident, Risø, Denmark, April 1980, CEC, V/4111/80.
- Carpenter, S. G., Montgomery, T. L., Leavitt, J. M., Colbaugh, W. C., & Thomas, F. W. (1971). Principal plume dispersion models: TVA Power Plants. Journal of Air Pollution Control Association, 21, 491-495.
- Cember, H., & Johnson, T. E. (2009). Introduction to health physics (4th ed.). McGraw-Hill.
- Clarke, R. H. (1979). A model for short and medium-range dispersion of radionuclides released to the atmosphere. Natl. Radiological Protection Board, Harwell, Oxon, GB, NRPB-R91.
- Crawford, T. V. (1978). Atmospheric transport of radionuclides. In P. O. Huffman et al. (Eds.), Proceedings of Workshop on the Evaluation of Models Used for the

Environmental Assessment of Radionuclide Releases (pp. NT1S). USDOE Report CONF-770901.

- Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (1976). Nuclear reactor analysis. Wiley.
- Gifford, F. A. (1953). An alignment chart for atmospheric diffusion calculations.
- Hanna, R. S., Briggs, G. A., Hosker Jr., R. P., & Gifford, F. A. (1982). Handbook on atmospheric diffusion.
- Hosker, Jr., R. P. (1967). Atmospheric environment.
- Hosker Jr., R. P. (Year). Estimates of dry deposition and plume depletion over forests and grasslands.
- IAEA. (1986). Atmospheric dispersion models for application in relation to radionuclide releases (TECDOC-379).
- Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement. Wiley.
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). Introduction to nuclear engineering. Prentice Hall.
- Lewis, E. E. (2008). Fundamentals of nuclear reactor physics. Academic Press.
- Martin, J. E. (2006). Radiation protection and measurement. Wiley.
- Murray, R., & Holbert, K. E. (2008). Nuclear energy: An introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. Butterworth-Heinemann.
- Price, J. (2000). Nuclear safety. American Nuclear Society.
- RESOLUCIÓN EXENTA (DISNR) No 052/2021.
- Todreas, N. E., & Kazimi, M. S. (1990). Nuclear systems volume I: Thermal hydraulic fundamentals. Taylor & Francis.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2008). Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 report to the General Assembly, with scientific annexes.

6.2 Anexos

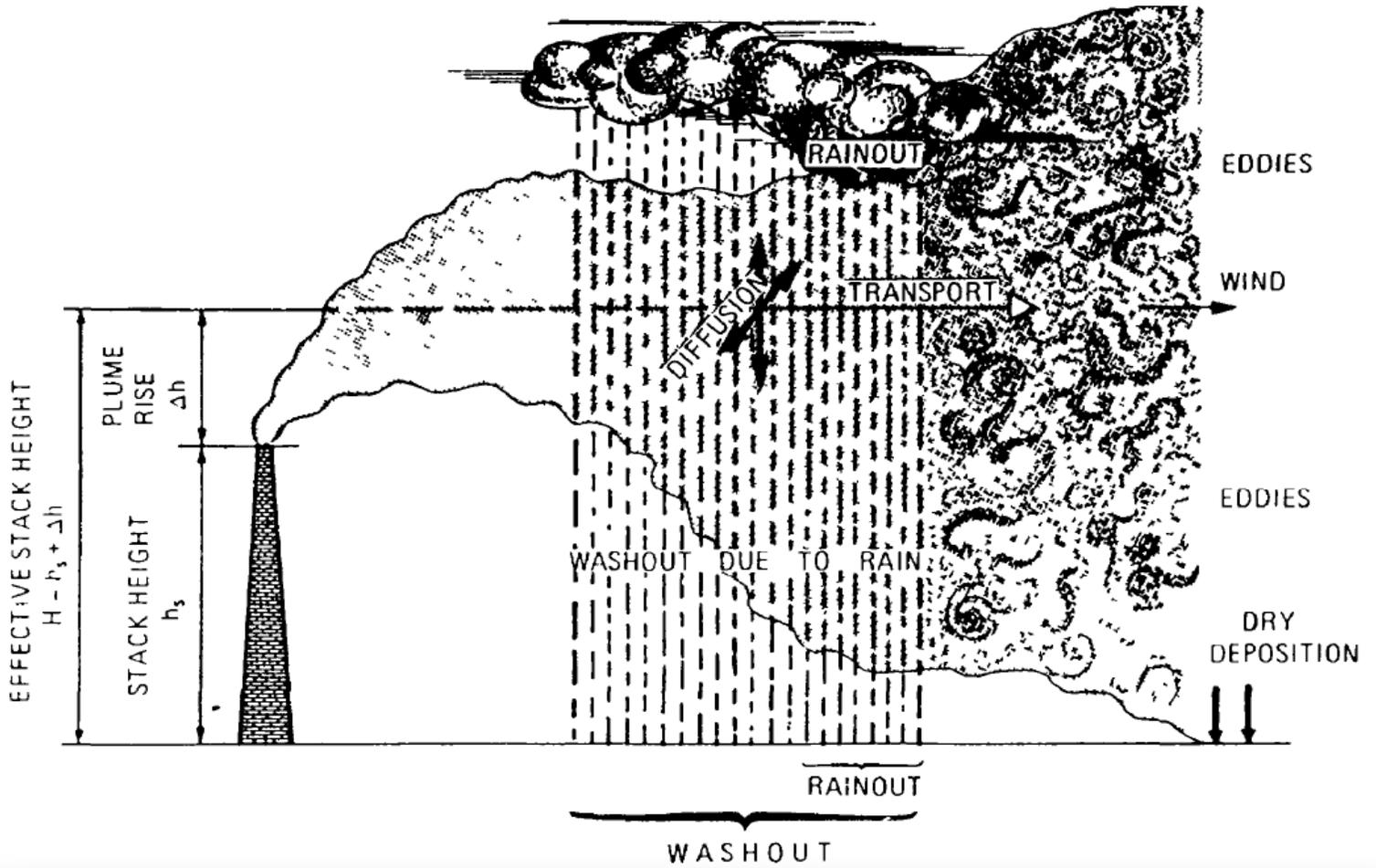


Figura 13 Compendio de fenómenos atmosféricos (IAEA, 1986)

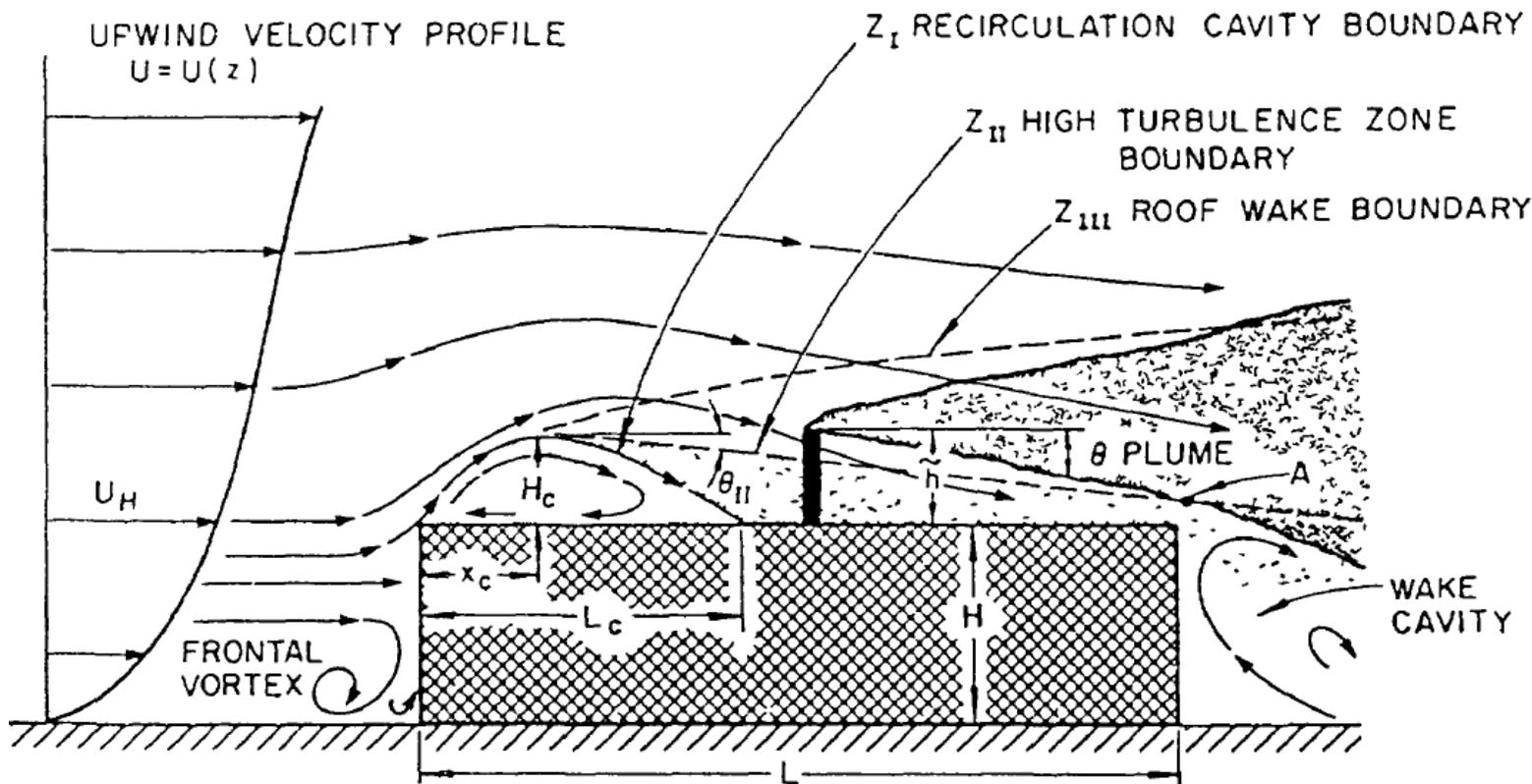


Figura 14 Comportamiento de la pluma en relación a obstáculos (IAEA, 1986)

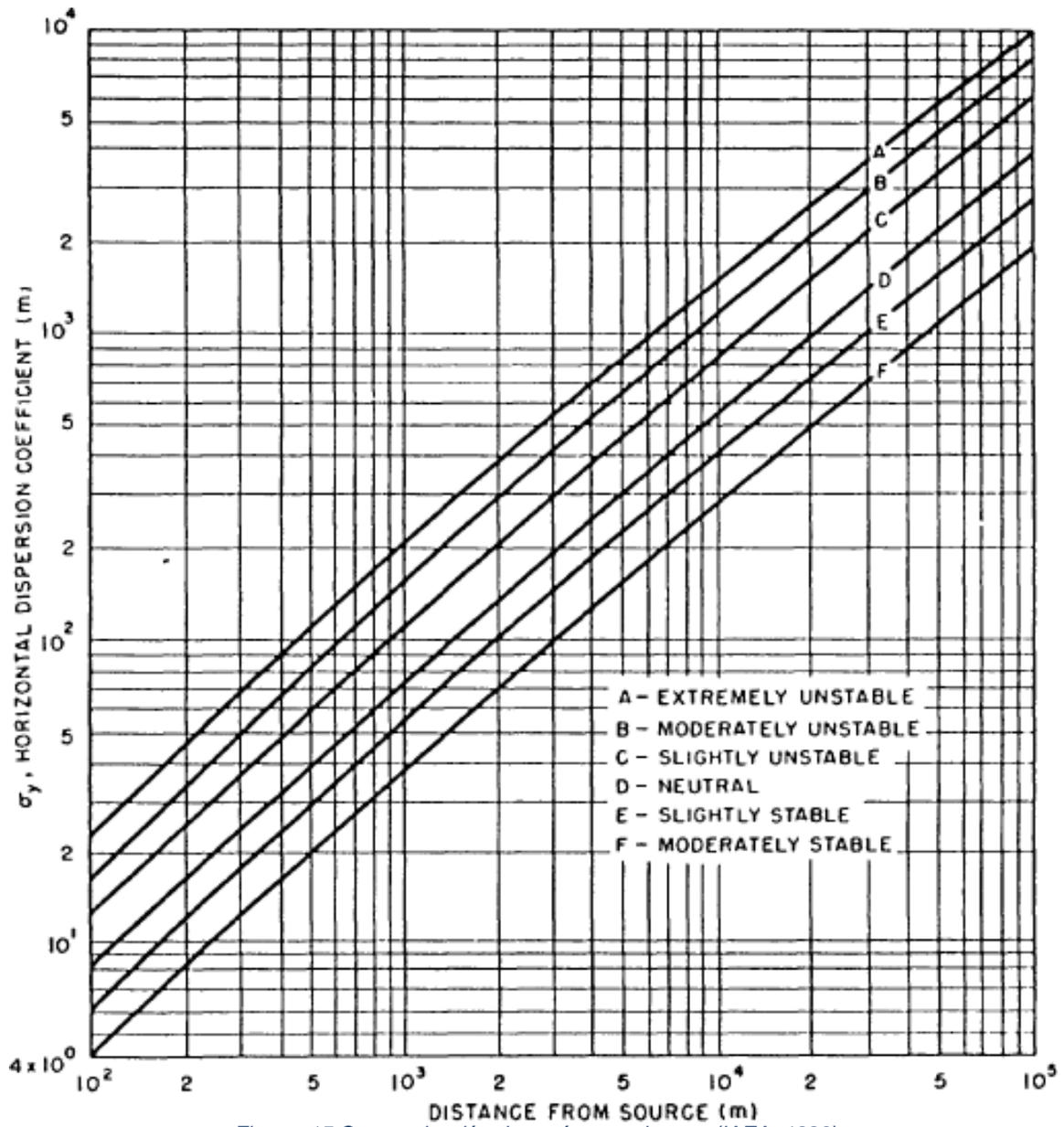


Figura 15 Caracterización de parámetro sigma y (IAEA, 1986)

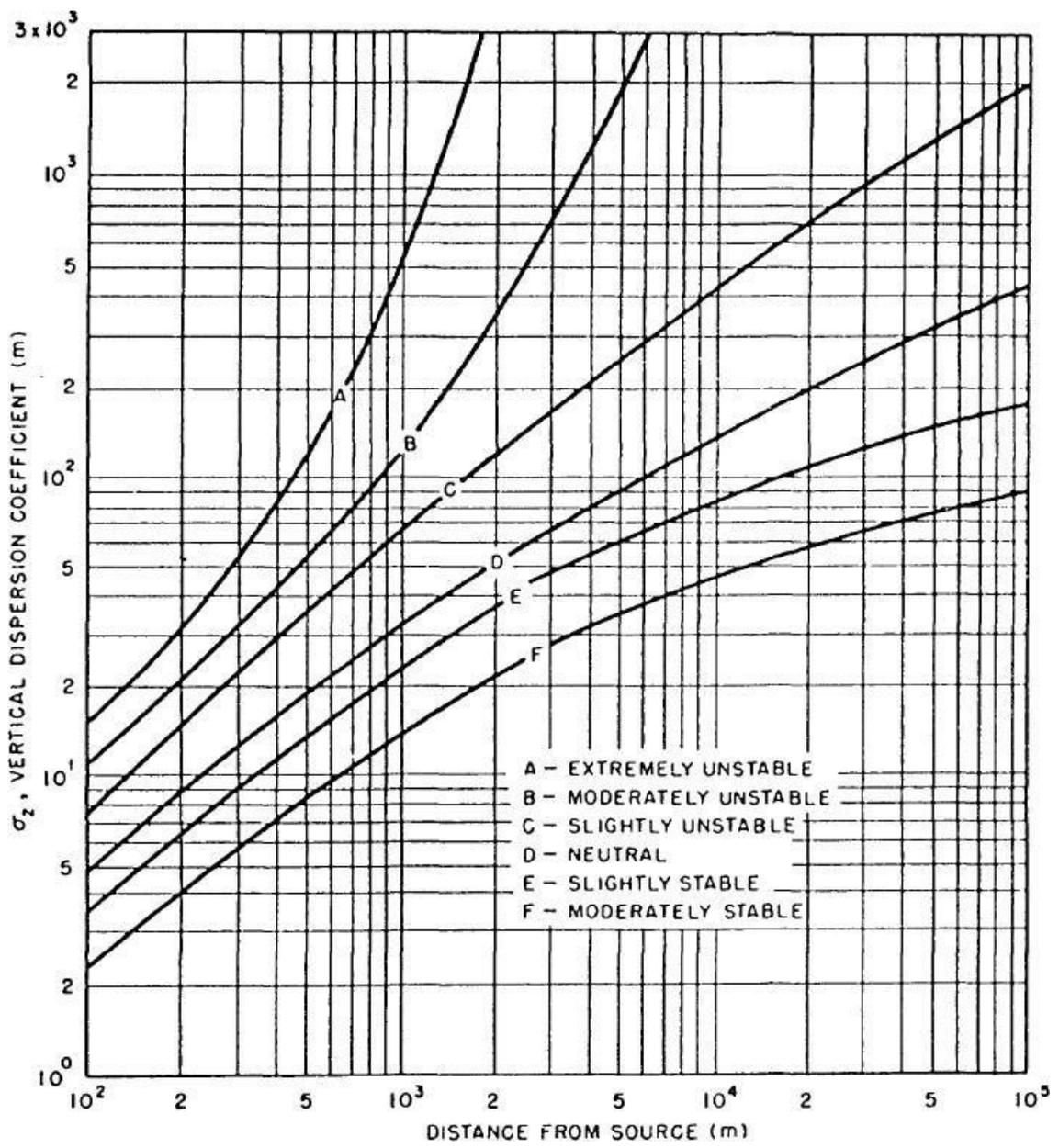


Figura 16 Caracterización de parámetro sigma y (IAEA, 1986)