



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

Diseño de un huerto-invernadero para medidas experimentales de dispersión atmosférica, deposición, re-emisión y transporte en suelos de isótopos hidrogenoides para análisis de impacto ambiental asociados al tritio

Autora: Mar López Rodríguez

Tutor: Luis Ángel Sedano Miguel

Oviedo, julio de 2016



Agradecimientos:

A Luis Sedano, gracias por tu dedicación, trabajo, apoyo y confianza. Gracias por hacer posible este Trabajo Fin de Máster.



Resumen Ejecutivo

Diseño de un huerto-invernadero para medidas experimentales de dispersión atmosférica, deposición, re-emisión y transporte en suelos de isótopos hidrogenoides para análisis de impacto ambiental asociados al tritio.

Este trabajo pretende generar una amplia formación en lo que se podría denominar “Ciencia ambiental en relación al tritio y a sus formas químicas (HT, HTO, T₂O)”. Los estudios de tritio en relación a su impacto ambiental con origen en instalaciones que manejan importantes inventarios en formas tritiadas y gestionan descargas de emisión representa hoy un ámbito de investigación de enorme relevancia a nivel mundial. Existen hoy en día análisis del más alto nivel académico entre comunidades científicas en lo que suponen la discusión sobre los límites dosimétricos recogidos en las regulaciones internacionales (ICRP 60, IAEA). Una reducción del límite dosimétrico de un orden de magnitud (de 1 mSv a la centena de μ Sv) en los límites de dosis crónicas para tritio supondría costes prohibitivos en la implementación a la confección de dispositivos de los principios de diseño nuclear (ALARA, Defensa en Profundidad). Lo anterior es enormemente relevante hoy en día con grandes experimentos en curso (ITER, KATRIN, ESS-Lund y otros) que manejan importantes cantidades de tritio. Recordando que cualquier instalación nuclear industrial actual (central nuclear de fisión) emite en órdenes de 1-10 Ci/año en formas tritiadas estos cambios regulatorios supondrían una enorme demanda y refinamiento en las tareas de vigilancia radiológica ambiental (ejemplo, en España Red REVIRA y otras). En este trabajo se pretende justificar que con una evaluación dosimétrica-ambiental sencilla (esquemas deterministas conservadores) pero muy sofisticada en lo que son los mecanismos y caminos de transferencia a dosis (tempranas y crónicas), se respetan estrictamente los límites dosimétricos establecidos en las regulaciones vigentes. Para ello: (1) Se revisan en detalle los esquemas ambientales que integran los mecanismos de emisión y los caminos de transferencia a dosis; (2) Se determinan los parámetros cuantitativamente sensibles que intervienen en dichos mecanismos de emisión y de transferencia en los modelos ambientales, con especial énfasis en la partición química de la presencia del tritio natural en la atmósfera y en los mecanismos que determinan los factores de conversión a dosis (DCF) y los caminos críticos a las dosis potenciales máximas; (3) Se revisan las bases de datos fundamentales del tritio en formas elementales (HT, T₂) y oxidadas (HTO, T₂O), que intervienen en dichos DCFs: propiedades isotópicas, reacciones de equilibrio e información cinética; (4) Se formula e implementa en un esquema numérico sencillo (MathCad 14.0) el modelo dosimétrico-ambiental para tritio.

Finalmente, se concreta en una instalación experimental (huerto-invernadero de análisis dosimétricos para tritio, [TRITIOVI](#)) para desarrollo futuro.



Executive Summary

Design of a garden-greenhouse for experimental measurements of atmospheric dispersion, deposition, re-emission and transport in hydrogen isotopes soils for environmental impact analysis associated with tritium.

This work aims to generate an extensive training in what might be called "Environmental Science in relation to tritium and their chemical forms (HT, HTO, T₂O)". Tritium studies, regarding environmental impact originating from facilities handling major forms tritiated inventories and manage emission downloads represents today a research relevant field worldwide. There are today high academic level discussions among scientific communities concerning the dosimetry limits set out at International Regulations (ICRP 60, IAEA). A reduction of the chronic doses of just one order of magnitude (from 1 mSv to 100 µSv) would mean prohibitive costs in terms of nuclear design and device manufacture (as ALARA Defense Depth principle implementation). Today big experiments are in progress (ITER, KATRIN, ESS-Lund and others) handling significant tritium amounts (kg). Recalling that any (nuclear fission plant) current industrial nuclear installation emits on orders 1-10 Ci per year these regulatory modification would mean a huge demand and refinement in the tasks of environmental monitoring (example, in Spain Red REVIRA and others). This Master Thesis is intended to justify that with a simple dosimetry-environmental assessment (a conservative deterministic scheme) very sophisticated in pathways mechanisms and on transfer to dose (early and chronic), dose limits established in the regulations in force are strictly guaranteed. For that purpose: (1) environmental schemes integrating emission mechanisms and pathways to transfer the doses are reviewed in detail; (2) quantitatively sensitive parameters involved in emissions and transfer environmental models are established, with special emphasis on the chemical partition from the presence of the natural tritium in the atmosphere and with critical dose conversion factors (DCF) to potential maximum doses; (3) the key database data in elementary forms of tritium (HT, T₂) and oxide (HTO, T₂O) involved in these DCFs are: isotopic properties and equilibrium reactions and kinetic information is revisited; (4) a simple numerical dosimetry and environmental model scheme (MathCad 14.0) for tritium is formulated and implemented.

Finally, an experimental installation (a garden greenhouse dosimetry analysis for tritium, TRITIOVI) is proposed.



MEMORIA



Índice

MEMORIA	5
1. Objetivos.....	16
2. Estructura del trabajo.....	19
3. Introducción: impacto ambiental de tritio en la atmósfera.....	21
3.1. Submodelo fuente y emisión	27
3.2. Submodelo de dispersión atmosférica.....	32
3.3. Submodelo de química atmosférica y deposición	35
3.4. Submodelo de transferencia atmósfera-superficie	40
3.5. Submodelo edafológico	43
3.6. Submodelo de transferencia a dosis al ser humano (OBT).....	49
3.6.1. Formación de OBT vegetal	51
3.6.2. Incorporación de OBT al animal.....	54
3.6.3. Modelo socioeconómico (humano).....	56
3.6.4. Cálculo determinista CEDE: individuos más expuestos (MEI).....	58
4. Desarrollo	61
4.1. Ciencia básica del tritio. Propiedades.....	61
4.1.1. Introducción	61
4.1.2. Interacción del tritio con gases, efluentes y materiales sólidos.....	62
4.1.2.1. Gases: el tritio en el aire y en otros compuestos gaseosos	62
4.1.2.2. Radioquímica del tritio en el agua.....	63
4.1.2.3. Interacción del tritio con materiales sólidos: hidruración, permeación y destilación.....	64
4.2. Justificación del tritio en la atmósfera.....	72
4.2.1. Producción natural de tritio	72
4.2.2. Producción artificial de tritio	73
4.2.2.1. Ensayos de armas nucleares atmosféricos.....	73



4.2.2.2. Plantas nucleares.....	75
4.2.2.3. Otras formas de producción artificial.....	76
4.2.2.4. Usos futuros del tritio.....	76
5. Programa TRITIOVI.xmcd	78
5.1. Descripción del modelo	78
5.2. Algunos casos paramétricos de interés	78
5.3. Resultados parciales	79
6. Diseño y especificaciones básicas del huerto-invernadero experimental	80
6.1. Configuración del huerto-invernadero.....	80
6.2. Equipamientos.....	84
6.3. Análisis dimensional: especificaciones	85
6.4. Planes experimentales prospectivos para el huerto-invernadero.....	86
7. Conclusiones	88
7.1. Próximos desarrollos	90
8. Bibliografía.....	91
ANEXOS.....	96
Anexo I. Clases de estabilidad atmosférica.....	97
Anexo II. Inputs. Propuesta de bases de datos	98
II.1. El tritio como radioisótopo	98
II.2. Magnitudes.....	98
II.3. Bases de datos.....	99
Anexo III. Magnitudes dosimétricas para el tritio y sus formas	102
III.1. Introducción.....	102
III.2. Dosimetría.....	102
III.3. Radioprotección	104
III.3.1 Magnitudes limitadoras para la radioprotección	106
III.3.2 Dosis equivalente y dosis efectiva comprometida	109



III.3.3. Magnitudes colectivas para grupos de individuos expuestos	110
Anexo IV: Detalles huerto-invernadero.....	113
Anexo V: Programa TRITIOVI.xmcd	118



Índice de figuras

Figura 1. Isótopos del hidrógeno. (NNDC)	21
Figura 2. Producción natural de tritio por la interacción de un neutrón rápido con nitrógeno en la alta atmósfera. (IAEA).....	21
Figura 3. Puntos de emisión de plantas nucleares en el mundo (495 reactores operativos en 2014). (IAEA)	22
Figura 4. Esquema cualitativo dosimétrico-ambiental adaptado a emisión de formas tritadas.....	25
Figura 5. Esquema de una chimenea, donde H es la altura eficaz, h es la altura de la chimenea y Δh es la elevación del penacho. (CNSC, 2009).....	27
Figura 6. Dispersión de contaminantes: tipos de penachos. (Masters Gilbert M., 2008) ..	28
Figura 7. Modelos de dispersión: penacho gaussiano. (Masters Gilbert M., 2008).....	29
Figura 8. Sistema de coordenadas de la pluma de dispersión que muestra una distribución gaussiana en las direcciones horizontal y vertical. (Turner, 1969)	32
Figura 9. Modelo conceptual que representa el ciclo hidrológico. (Baver, 1956)	35
Figura 10. Porcentaje de las formas tritadas emitidas a la atmósfera.....	38
Figura 11. Transferencia de tritio en ambientes terrestres en las interfases aire-suelo-planta. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010).....	43
Figura 12. Esquema de los posibles caminos (absorción, transmisión y re-emisión) que sigue el tritio en forma de HT o HTO una vez que se deposita en el suelo. En los primeros centímetros del suelo, el hidrógeno tritado HT depositado se transforma rápidamente en agua tritada HTO por la acción de los microorganismos (los microorganismos que presentan una mayor actividad oxidante son los <i>Actinomicetos</i> , una familia de bacterias <i>Gram-positivas</i> que está presente en un 94% de los suelos cultivados y en un 84% de los suelos naturales (Mayol, 2004)) tales como bacterias, musgos y microorganismos protozoarios o por el agua contenida en el propio suelo, proceso conocido como oxidación. Como consecuencia, todo el tritio depositado en el suelo (HT y HTO), se encuentra finalmente en la forma de HTO. Esto permite al tritio participar en todos los procesos relativos al ciclo del agua, tales como la evapotranspiración (re-emisión a la atmósfera), absorción a través de las raíces de las plantas y transporte (infiltración) al subsuelo, lo que le permitiría alcanzar el nivel freático incorporándose a las aguas subterráneas y, por consiguiente, a las aguas de consumo (problema de salud público). Este sería uno de los principales mecanismos de incorporación de HTO al ser humano, a	



través de la ingestión de bebidas tritiadas. Estos intercambios se ralentizan cuanto más seco sea el suelo y con la presencia de vegetación..... 45

Figura 13. Vías químicas de formación de t-OBT. La primera (1) de ellas es una reacción de intercambio mientras que la segunda (2) es por la acción fotosintética. Estas reacciones pueden ser reversibles, es decir, de transformación de t-OBT a HTO para evapotranspiración en las hojas del vegetal..... 52

Figura 14. Esquema dieta mediterránea a efectos de consideración de entradas de vegetales de consumo. (Google) 53

Figura 15. Transferencia de tritio en ambientes terrestres en los animales, incluida la transferencia a los productos alimenticios. En condiciones normales la concentración de HTO vacuno y leche se calculan conociendo la cantidad de forraje, agua, tasa de respiración y absorción por la piel, así como la concentración de HTO de cada componente de forraje. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010). 54

Figura 16. Parámetros principales a considerar en el modelo socioeconómico..... 57

Figura 17. Centrales Nucleares en España. (Ministerio de Industria, Energía y Turismo) 59

Figura 18. Formas isotópicas del hidrógeno. (Glosarios-servidor-alicante.com)..... 61

Figura 19. Desintegración beta del tritio. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2009) 61

Figura 20. Evolución de las actividades de las diferentes formas gaseosas del tritio en la atmósfera a lo largo de los años. (DEI (ISRN) - Direction de l'environnement et de l'intervention, 2009)..... 62

Figura 21. Equilibrios que se producen en el agua tritiada. (DEI (ISRN) - Direction de l'environnement et de l'intervention, 2009) 63

Figura 22. Tabla de los hidruros binarios y la electronegatividad de Allred- Rochow. (Association)..... 64

Figura 23. Diagramas de fase de la hidruración. Isotermas presión-composición para la absorción de hidrógeno en un compuesto intermetálico. La solución sólida (fase- α), la fase híbrida (fase- β) y la región de coexistencia de las dos fases. (Association) 65

Figura 24. Diagramas de fase de la hidruración. (a) Izquierda. Diagrama de fase UH_x . (b) Derecha. Diagrama de fase $ZrCoH_x$. (Sedano) 66

Figura 25. Esquema fenomenología de la permeación. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014) 67

Figura 26. Proceso de permeación. (DuPont) 68



Figura 27. Mecanismos de transporte implicados en la permeación. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)	69
Figura 28. Diagramas de energía en la permeación. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)	69
Figura 29. Principales isotopómeros del hidrógeno con sus respectivos puntos de ebullición. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)	71
Figura 30. Proceso de destilación. (Google)	71
Figura 31. La radiación cósmica aumenta con la altura ya que disminuye la protección que nos proporciona la atmósfera terrestre. La figura ilustra los valores anuales de radiación cósmica a diferentes altitudes. (CSN, Dosis de radiación, 2010)	73
Figura 32. Número de explosiones de armas nucleares realizadas en la atmósfera entre 1944 y 1980 (Bedmar, 2006).	74
Figura 33. Cambios en las concentraciones de tritio en el agua de lluvia en el hemisferio norte entre 1945 y 2008. Los valores en rojo son los niveles de fondo en 1945 y 2008. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010)	75
Figura 34. Huerto-invernadero. Vista exterior.....	80
Figura 35. Huerto invernadero. Detalle chimenea.	80
Figura 36. Huerto-invernadero. Sectores bioclimáticos.	81
Figura 37. Climas de España. (El clima, la vegetación y la fauna de España)	82
Figura 38. Huerto invernadero. Detalle del suelo, subsuelo y atmósfera.....	82
Figura 39. Factor de calidad, Q. (ICRP-60, 1991)	106
Figura 40. Factor de ponderación w_R para neutrones en función de la energía de los neutrones (ICRP-103, 2007).	108
Figura 41. Huerto invernadero. Vista frontal.....	113
Figura 42. Huerto invernadero. Vista planta.	113
Figura 43. Detalle suelo cultivable.	114
Figura 44. Detalle clima de montaña.....	114
Figura 45. Detalle clima mediterráneo.....	115
Figura 46. Detalle clima oceánico.	115
Figura 47. Detalle clima continental.	116
Figura 48. Detalle clima subtropical.	116
Figura 49. Detalle ventilador y lámpara.....	117



Índice de tablas

Tabla 1. Directrices de emisión de proyectos nucleares en relación al tritio. (ICRP-60, 1991)	23
Tabla 2. Exponente p para corrección de la velocidad del viento en función de la <i>clase de estabilidad</i> . (Peterson, 1978)	33
Tabla 3. Valores de las constantes a, p, b, q en función de las clases de estabilidad. (Martin, 1976)	34
Tabla 4. Coeficientes de dispersión (m) para distintas distancias en la dirección del viento (km). (Masters Gilbert M., 2008)	34
Tabla 5. Distribución natural de tritio. (Begemann, 1963)	36
Tabla 6. Rugosidades del terreno en función del tipo de superficie. (Briggs, 1972).....	39
Tabla 7. Clasificación ingenieril de un suelo. (USCS)	47
Tabla 8. Formas ligadas de tritio y sus principales características. (Mayol, 2004).....	50
Tabla 9. Tasas de consumo promedio de la población española. (A. M. Requejo).....	58
Tabla 10. Clases de estabilidad atmosférica. (Masters Gilbert M., 2008)	97
Tabla 11. Clasificación de las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill. (Turner, 1969)	97
Tabla 12. Datos físicos generales del tritio. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014).....	99
Tabla 13. Propiedades termofísicas básicas del hidrógeno (H ₂), tritio elemental (HT) y tritio (T ₂). (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)	100
Tabla 14. Propiedades termo-isotópicas básicas. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014).....	100
Tabla 15. Punto de ebullición y presión de vapor de las especies oxidadas. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)	100
Tabla 16. Formas oxidadas: presiones de vapor isotópicas en T: P _{H₂O} /P _(x) . (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)	100
Tabla 17. Formas oxidadas: constantes de equilibrio isotópico. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014).....	100
Tabla 18. Factor de Calidad según el tipo de radiación (Butí, 1990).	105
Tabla 19. Factores de ponderación de radiación recomendados (ICRP-103, 2007).....	107
Tabla 20. Factores ponderales de radiación (ICRP-60, 1991).....	108
Tabla 21. Factores de ponderación de los tejidos recomendados (ICRP-103, 2007).	109



Tabla 22. Factores ponderales de tejido (ICRP-60, 1991)..... 109



Abreviaturas

ACP	A ctivated C orrosion P roducts
AEMET	A gencia E statal de M ETeorología
ALARA	A s L ow A s R easonably A chievable
AP	A ctivation P roducts
BDBA	B eyond D esign B asis A ccident
CANDU	C ANadian D euterium U ranium
CDTI	C entro para el D esarrollo T ecnológico I ndustrial
CEA	C ommissariat à l' É nergie A tomique
CEDE	C ommitted E ffective D ose E quivalent
CSN	C onsejo de S eguridad N uclear
DBA	D esign B asis A ccident
DCF	D ose C onversion F actor
e-OBT	E xchange O rganically B ound T ritium
ESS	E uropean S pallation S ource
GIS	G eographic I nformation S ystem
HWR	H eamy W ater R eactor
IAEA	I nternational A tomie E nergy A gency
ICRP	I nternational C ommission on R adiological P rotection
ICRU	I nternational C ommission on R adiation U nits and measurements
IFMIF	I nternational F usion M aterials I rradiation F acility
IPSN	I nstituto para la P rotección de la S alud N atural



IRSN	Institut de R adioprotection et de S ûreté N ucléaire
ITER	International Thermonuclear E xperimental R eactor
KATRIN	K arlsruhe T ritium N eutrino experiment
LAI	L eaf A rea I ndex
LSC	L iquid S cintillation C ounting
MEI	M ost E xposed I ndividual
OBT	O rganically B ound T ritium
PWR	P ressurized W ater R eactor
REVIRA	R ed E spañola de V igilancia R adiológica A mbiental
SAR	S pecific A ctivity R atio
TFWT	T issue F ree W ater T ritium
t-OBT	T ightly O rganically B ound T ritium
UNSCEAR	U nited N ations S cientific C ommittee on the E ffects of A tomc R adiation
USCS	U nified S oil C lassification S ystem



1. Objetivos

Este trabajo pretende generar una amplia formación en lo que se podría denominar “Ciencia ambiental en relación al tritio y a sus formas químicas (HT, HTO, T₂O)” en múltiples aspectos: propiedades fundamentales, dispositivos que manejan tritio y procesos industriales, emisiones e impacto ambiental dosimétrico, etc.

Los estudios de tritio en relación a su impacto ambiental con origen en instalaciones que manejan importantes inventarios (del orden de kilogramos) en formas tritadas (elementales gaseosas: HT/T₂, oxidadas en forma de vapor o líquida: HTO/T₂O, tritio-carbonadas gaseosas: C_xH_yT_z, otras formas asociadas a productos de activación y corrosión) y gestionan descargas de emisión, representa hoy un ámbito de investigación de enorme relevancia a nivel mundial.

Existen hoy en día discusiones del más alto nivel científico entre comunidades académicas (comunidades científicas en Física de la Salud y la Radioprotección) en lo que deben ser los límites dosimétricos recogidos en las regulaciones internacionales (ICRP 60, IAEA). Una reducción del límite dosimétrico de un orden de magnitud (de 1 mSv a la centena de μSv) en los límites de dosis crónicas para tritio supondría costes prohibitivos en la implementación a la confección de dispositivos de los principios de diseño nuclear (ALARA, Defensa en Profundidad). Lo anterior es enormemente relevante hoy en día con grandes experimentos en curso (ITER, KATRIN, ESS-Lund y otros) que manejan importantes cantidades de tritio.

La reciente regulación europea (Directiva 2013/51/Euratom, 2013), de inminente transposición al derecho ambiental Español, impone un estricto control radiológico en aguas destinadas al consumo humano en lo que respecta al radón y al tritio, aplicando un valor paramétrico de 100 Bq·l⁻¹ para ambos y siendo necesaria la medición de 10 Bq·l⁻¹ para el tritio.

Recordando que cualquier instalación nuclear industrial actual (central nuclear de fisión) emite en ordenes de 1-10 Ci/año en formas tritadas, estos cambios regulatorios supondrían una enorme demanda y refinamiento en las tareas de vigilancia radiológica ambiental (ejemplo, en España Red REVIRA y otras).

En este trabajo se pretende justificar que con una evaluación dosimétrica-ambiental sencilla (esquemas deterministas conservadores) pero muy sofisticada en lo que son los mecanismos y caminos de transferencia a dosis (tempranas y crónicas), se



respetan estrictamente los límites dosimétricos establecidos en las regulaciones vigentes.

Para ello:

- (1) Se revisan en detalle los esquemas ambientales que integran los mecanismos de emisión y los caminos de transferencia a dosis;
- (2) Se determinan los parámetros cuantitativamente sensibles que intervienen en dichos mecanismos de emisión y de transferencia en los modelos ambientales, con especial énfasis en la partición química de la presencia del tritio natural en la atmósfera y en los mecanismos que determinan los *factores de conversión a dosis (DCF)* y los caminos críticos a las dosis potenciales máximas;
- (3) Se revisan las bases de datos fundamentales del tritio en sus formas elementales (HT, T₂) y oxidadas (HTO, T₂O), que intervienen en dichos DCFs: propiedades isotópicas y reacciones de equilibrio e información cinética;
- (4) Se formula e implementa en un esquema numérico sencillo (MathCad 14.0) el modelo dosimétrico-ambiental para tritio.

Finalmente, se concreta en una instalación experimental (huerto-invernadero de análisis dosimétricos para tritio, [TRITIOVI.xmcd](#)) para desarrollo futuro.

Se ha realizado un esfuerzo exhaustivo y sistemático de análisis y confección de una base de datos isotópica (magnitudes termo-físicas básicas, químicas de equilibrio y cinéticas isotópicas) y de revisión de todas las formas físico-químicas de interacción (permeación, absorción/desorción, etc) del tritio con diversos tipos de materiales.

El objetivo último de este trabajo se ha centrado en generar una capacidad de evaluación dosimétrica ambiental con origen en las emisiones (normales, incidentales o accidentales) del tritio y de sus formas al ambiente y a la población expuesta. Para ello, se revisan en profundidad los caminos potenciales de transferencia a dosis y todo el amplio abanico de magnitudes dosimétricas básicas.

La formulación de un modelo ambiental de tipo determinista para las emisiones de formas de tritio permite identificar el conjunto de magnitudes y factores dosimétricos de interés para la obtención experimental futura.



Se genera y diseña finalmente un modelo experimental (huerto-invernadero) para la determinación de dichas magnitudes, factores y dependencias críticas a modo de resultado global de este Trabajo Fin de Máster.



2. Estructura del trabajo

El siguiente trabajo se encuentra dividido en dos partes principales: Memoria y Anexos. Inicialmente se incluye un *Resumen Ejecutivo*, *Executive Summary*, *Índice general*, *Índice de figuras*, *Índice de tablas* y una sección de *Abreviaturas*.

La **primera parte** consta de ocho capítulos bien diferenciados. En el capítulo 1: *Objetivos* se citan los principales propósitos que pretende conseguir este trabajo. El capítulo 2: *Estructura del trabajo*, pretende realizar un breve esquema de cómo está distribuido el trabajo para facilitar al usuario su comprensión y manejo. A continuación, en el apartado 3: *Introducción: impacto ambiental del tritio en la atmósfera*, se describen los distintos submodelos que engloban el modelo dosimétrico-ambiental. Estos son (1) submodelo fuente y emisión; (2) submodelo de dispersión atmosférica; (3) submodelo de química atmosférica y deposición; (4) submodelo de transferencia atmósfera-superficie; (5) submodelo edafológico y (6) submodelo de transferencia a dosis al ser humano (OBT), que incluye subapartados tales como la formación de OBT vegetal y su incorporación al animal, el modelo socioeconómico (humano) y un cálculo determinista CEDE, considerando como caso crítico *los Individuos Más Expuestos (MEI)*. El capítulo 4: *Desarrollo* incluye dos subapartados. El primero, *Ciencia básica del tritio*, explica las principales características del radioisótopo y los distintos mecanismos de interacción con gases, efluentes y sólidos. En el siguiente subapartado, *Justificación del tritio en la atmósfera*, se exponen los distintos procesos y mecanismos de producción natural y artificial de tritio. En el capítulo 5: *Programa TRITIOVI.xmcd*, se describe brevemente el software empleado MathCad 14.0 para la realización de un cálculo determinista de tipo conservador. El capítulo 6: *Diseño y especificaciones básicas del huerto-invernadero experimental* incluye su descripción cualitativa y división en cinco sectores bioclimáticos, el equipamiento empleado, así como los planes experimentales prospectivos para el huerto-invernadero. El capítulo 7: *Conclusiones*, refleja las conclusiones parciales y finales obtenidas tras la realización de dicho trabajo de investigación, haciendo incidencia en futuros desarrollos. Finalmente, el capítulo 8: *Bibliografía* hace una relación de las distintas referencias bibliográficas consultadas,

La **segunda parte** incluye cinco Anexos en los que se engloban las *Clases de estabilidad atmosférica (Anexo I)*, una *Propuesta de bases de datos* de las propiedades



básicas del tritio (*Anexo II*), las *Magnitudes dosimétricas para el tritio y sus formas* (*Anexo III*), *Detalles del huerto-invernadero* (*Anexo IV*) y *Programa TRITIOVI.xmcd* (*Anexo V*).

3. Introducción: impacto ambiental de tritio en la atmósfera

La reciente importancia de los estudios de impacto ambiental asociados al tritio, el único isótopo radiactivo del hidrógeno, junto con el cumplimiento de los límites dosimétricos vigentes, son las principales premisas para la realización de este trabajo de inicio a la investigación.

Las herramientas empleadas para la comprensión de los distintos mecanismos de emisión y transferencia en los modelos ambientales son los esquemas ambientales y los mecanismos de transferencia a dosis, que se analizarán en detalle en esta sección, Figura 4. Entre los distintos mecanismos de transferencia a dosis desde la emisión de una fuente se estudiarán principalmente los procesos de dispersión atmosférica, deposición en el suelo y vegetales, penetración y transporte en el subsuelo, re-emisión y posterior conversión a tritio orgánico.

1H STABLE 99.9885%	2H STABLE 0.0115%	3H 12.32 Y β-: 100.00%	4H N: 100.00%	5H 5.7 MeV 2N: 100.00%	6H 1.6 MeV N: 100.00%	7H 29E-23 Y 2N:
--------------------------	-------------------------	------------------------------	------------------	------------------------------	-----------------------------	-----------------------

Figura 1. Isótopos del hidrógeno. (NNDC)

El tritio, tercer isótopo del hidrógeno, en la atmósfera procede tanto de fuentes naturales como de fuentes artificiales. Las primeras incluyen determinadas reacciones nucleares inducidas por la interacción en la estratosfera de las radiaciones cósmicas principalmente con nitrógeno y otros elementos, tales como el oxígeno.

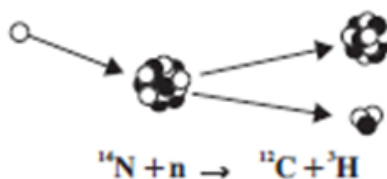


Figura 2. Producción natural de tritio por la interacción de un neutrón rápido con nitrógeno en la alta atmósfera. (IAEA)

Entre las fuentes artificiales de origen antropogénico, las más destacadas para la presencia del tritio en la atmósfera fueron las pruebas nucleares realizadas principalmente entre 1952 y 1963. Otras causas artificiales que producen la emisión de tritio a la atmósfera son las centrales nucleares de producción de energía eléctrica (dependiendo del tipo de central hasta 10 Ci/GW_e·año), las plantas de producción de tritio para

proyectos militares (información generalmente clasificada), las plantas de tratamiento de combustibles nucleares, los grandes experimentos científicos (ITER, KATRIN, IFMIF, etc) y los sistemas de propulsión nuclear, entre otras (Bedmar, 2006).

Cabe indicar que el tritio antropogénico, cuya principal fuente de producción (civil¹) y de emisión son los reactores nucleares y especialmente los CANDU (**CAN**adian **D**euterium **U**ranium) o HWR (**H**eamy **W**ater **R**eactor), presenta características diferentes a las del tritio natural, ya que se emite desde puntos concretos. Este trabajo se centra en los distintos mecanismos de transferencia del tritio artificial.

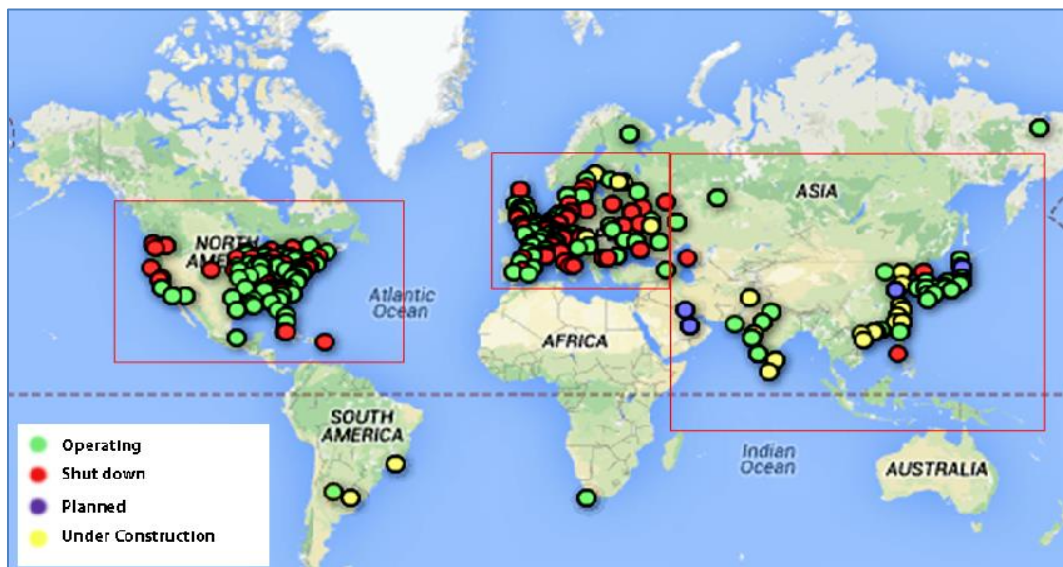


Figura 3. Puntos de emisión de plantas nucleares en el mundo (495 reactores operativos en 2014). (IAEA)

El tritio antropogénico se emite en diversas formas (Mayol, 2004):

- Formas elementales gaseosas: HT, T₂ (gas seco)
- Formas oxidadas: HTO (vapor), T₂O (vapor) o formas condensadas
- Formas ligadas a productos de activación y corrosión en los dispositivos (larga lista de ejemplos: tritio ligado a wolframio o carbono en reactores de fisión, tritio ligado a otros productos de corrosión como el hierro, etc²).

¹ Los CANDU construyen inventario en continuo en el agua deuterada por reacciones ${}^2\text{D}(n,\gamma){}^3\text{H}$. La sección eficaz σ (25°C) = 0,00053 barns.

² Estas formas ligadas del tritio no se tendrán en consideración en este trabajo y son de interés sólo en condiciones incidentales y accidentales, no para descargas en operación normal.



El tritio natural se distribuye en la atmósfera siguiendo los llamados *modelos de partición* ligados a los ciclos naturales de otros elementos abundantes: ciclo del agua, ciclo del carbono, ciclo del nitrógeno, etc, adoptando las siguientes formas químicas:

- Elementales gaseosas: HT, T₂
- Oxidadas en fase vapor o líquida: HTO, T₂O
- Tritio-carbonadas gaseosas: C_xH_yT_z (la forma más común es el gas metano tritiado, CH₃T)
- Formas orgánicas ligadas (*OBT, Organically Bounded Tritium*)

Por razones estadísticas relacionadas con las abundancias isotópicas, las dos formas químicas que se encuentran en mayor abundancia en el medio ambiente, además de ser las principales emitidas en los reactores nucleares de fusión, son por orden de importancia, el agua tritiada (HTO) y el tritio elemental (HT). Las cantidades de las formas respectivas T₂O y T₂ pueden considerarse marginales en términos de cálculo de dosis.

Tabla 1. Directrices de emisión de proyectos nucleares en relación al tritio. (ICRP-60, 1991)

Eventos o Condiciones	Meta	Directrices de Emisión de Proyectos (a)
Operación Normal , que comprende secuencias de eventos y condiciones de la planta planeadas y requeridas para el funcionamiento normal del ITER, incluidas algunas faltas, eventos o condiciones que puedan ocurrir como resultado de la naturaleza experimental del ITER	Reducir emisiones a niveles tan bajos como sea razonablemente realizable pero asegurando que no excedan las directrices de emisión de proyectos para Operación Normal	< 1 g-T como HT y 0,1 g-T como HTO y 1 g-metal como AP y 5 g-metal como ACP por año
Incidentes , que comprenden desviaciones del funcionamiento normal, secuencias de eventos o condiciones de la planta no planeadas pero que es probable que ocurran debido a fallos una o más veces durante la vida de la planta, pero sin incluir la Operación Normal	Reducir la probabilidad y magnitud de las emisiones con el objetivo de prevenir emisiones, pero asegurando que no exceden las directrices de emisión de proyectos para Incidentes	< 1 g-T como HT o 0,1 g-T como HTO o 1 g-metal como AP o 5 g-metal como ACP por año o una combinación equivalente de estos por secuencia
Accidentes , que comprenden secuencias de eventos postulados o condiciones que no es probable que ocurran durante la vida de la central	Reducir la probabilidad y magnitud de las emisiones pero asegurando que no exceden las directrices de emisión de proyectos para Accidentes	< 50 g-T como HT o 5 g-T como HTO o 50 g-metal como AP o 50 g-metal como ACP o una combinación equivalente de estos por secuencia
(a) HT: tritio elemental (incluido DT); HTO: óxido de tritio (incluido DTO); AP: desviador o primera barrera de productos de activación; ACP: productos de corrosión activados ³		

³ El estudio de los AP y los ACP no se tendrá en consideración en este trabajo.



Se estudiarán de manera separada ya que su comportamiento en el medio ambiente es muy diferente así como su impacto dosimétrico. En general, las formas oxidadas (HTO, T_2O) presentan *factores de conversión a dosis (DCF)* muy superiores porque se fijan mucho mejor desde el punto de vista de la incorporación (inhalación e ingestión) o contacto. No obstante, los efectos dosimétricos del HT no deben ser despreciados y muy en especial en lo que son las dosis tempranas. Por esta razón, las directrices de emisión de dispositivos nucleares Tabla 1, distinguen cuantitativamente entre ambas formas, HT y HTO.

Tal como se muestra en la Tabla 1, las Directrices de Emisión de Proyectos imponen límites dosimétricos de referencia, es decir, límites al término fuente, en relación a las emisiones de tritio. En el caso de Operación Normal, los límites se establecen en menos de un gramo de tritio en forma de HT y 0,1 gramos de tritio en forma de HTO. Para emisiones incidentales, estos límites deben ser inferiores a 1 gramo de tritio como HT o a 0,1 gramos de tritio como HTO, mientras que en el caso de emisiones accidentales, los límites deben ser menores de 50 gramos de tritio para el HT o 5 gramos de tritio para el HTO.

Los límites ambientales se establecen en el ámbito de las sociedades científicas de Protección Radiológica y de Física de la Salud. Dichos límites de impacto dosimétrico condicionan los límites en los términos fuente de emisión e imponen soluciones de diseño (interposición de barreras, control de atmósferas, etc) para garantizarlos de manera acorde con los principios básicos del diseño nuclear: ALARA y Defensa en Profundidad, tanto en operación normal, como incidental o accidental. El principio supremo de la seguridad industrial (no sólo la seguridad nuclear) establece que la seguridad absoluta tiene coste infinito. Así, en las soluciones finales de diseño aparece el factor coste, aunque en el diseño nuclear prime la seguridad frente a éste. En general, se diseñan los dispositivos nucleares desde el punto de vista del impacto radiológico-ambiental de manera que los *Accidentes Base de Diseño (BDA)* o *Accidentes Más Allá del Diseño (BBDA)* supongan sólo porcentajes de la emisión nominal que conduciría al límite de dosis.

El impacto ambiental impone exigencias al diseño de los dispositivos nucleares.

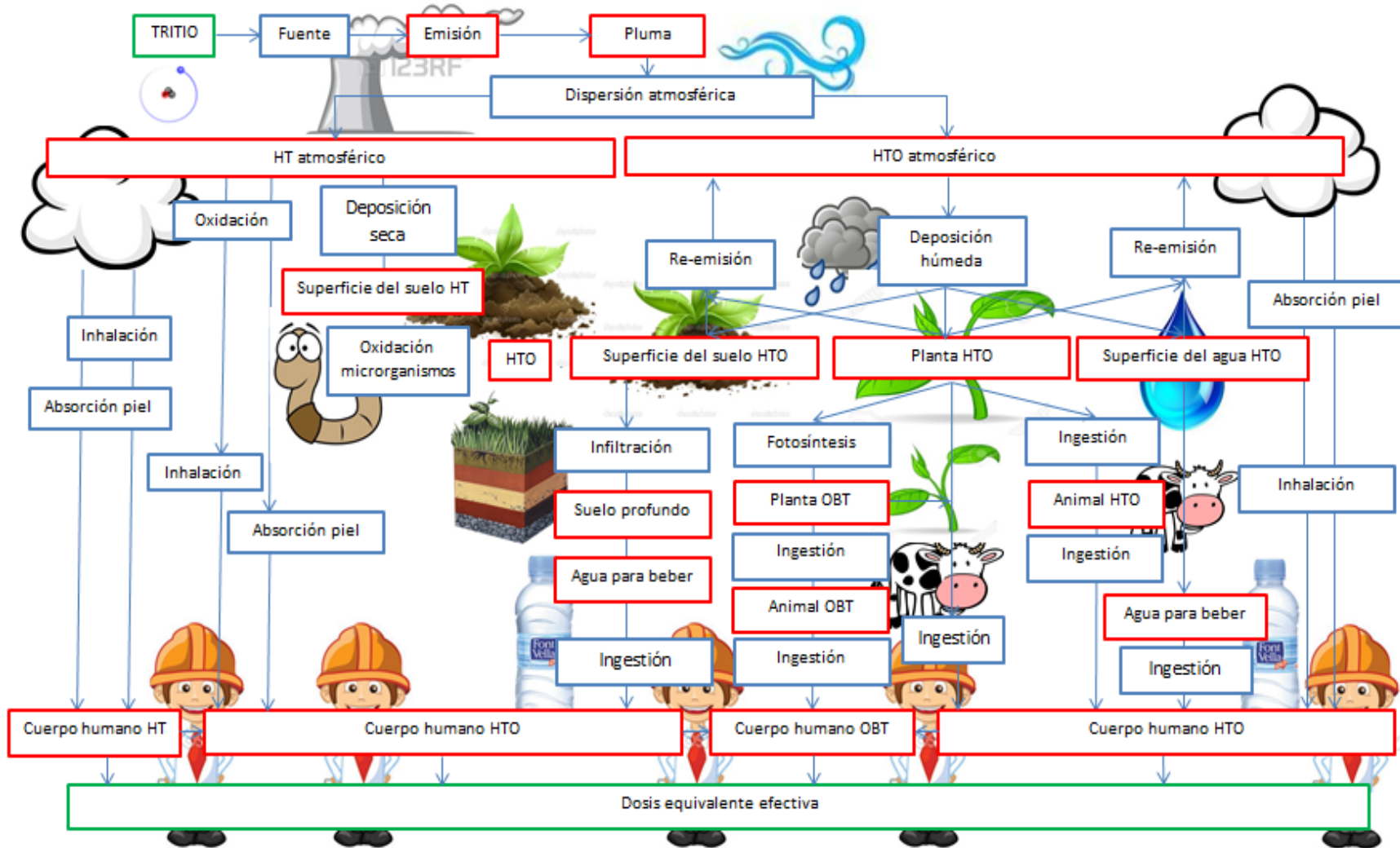


Figura 4. Esquema cualitativo dosimétrico-ambiental adaptado a emisión de formas tritadas.



En la Figura 4 se representa, de manera cualitativa, un modelo fenomenológico dosimétrico-ambiental complejo constituido por seis submodelos, que se citan a continuación:

- Submodelo fuente y emisión
- Submodelo de dispersión atmosférica
- Submodelo de química atmosférica y deposición. En este apartado hay que tener en cuenta las propiedades físico-químicas de la atmósfera⁴.
- Submodelo de transferencia atmósfera-superficie
- Submodelo edafológico
- Submodelo de transferencia a dosis al ser humano

El modelo empleado será de tipo determinista conservativo.

⁴ Las bases de datos se explican en el capítulo *Anexo II. Inputs. Propuesta de bases de datos.*

3.1. Submodelo fuente y emisión

Dentro del submodelo fuente cabe hacer una diferenciación entre fuentes planas (emitir directamente desde el suelo), focalmente distribuidas, chimeneas y torres de refrigeración (a modo de chimenea de emisión). El caso más conservador, conducente a mayores dosis en fases tempranas sería la emisión directa desde el suelo, altura cero. Por el contrario, las emisiones realizadas desde una chimenea serían conservadoras, es decir, conducentes a mayores dosis crónicas, ya que el penacho en elevación llegaría a mayores distancias y potencialmente a población más alejada.

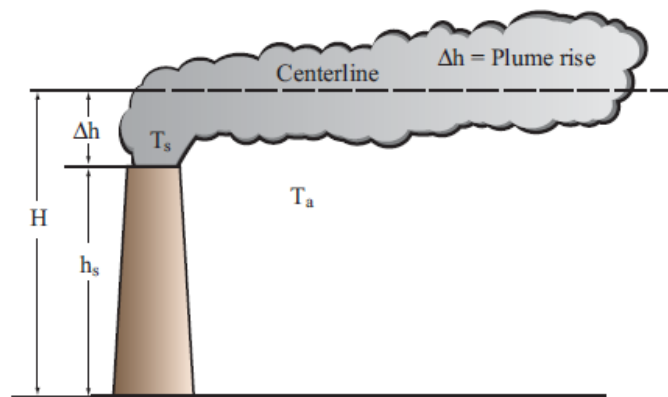


Figura 5. Esquema de una chimenea, donde H es la altura eficaz, h es la altura de la chimenea y Δh es la elevación del penacho. (CNSC, 2009)

Los principales parámetros que definen la fuente y, por consiguiente la emisión son:

- Altura de la chimenea
- *Clase de estabilidad atmosférica local*⁵
- Tipo de emisión (fluidos y su composición)
- Velocidad de liberación del efluente
- Velocidad media del viento en relación a la *clase de estabilidad*
- Condiciones térmicas de la chimenea

Estas características determinan una clasificación de penachos de emisión, cuyos parámetros son: su forma, su volumen, su alcance, sus características hidrodinámicas (grado de turbulencia), etc. Dichas características determinan el transporte de las formas

⁵ Para mayor información consultar *Anexo I. Clases de estabilidad atmosférica.*

tritiadas en las fases tempranas de la emisión. Cada tipo de penacho y cada *clase de estabilidad atmosférica* establecen su propia frontera entre la influencia de la propia fuente de emisión o los mecanismos de dispersión atmosférica desligados de la fuente, que establecen el tiempo cero para la dispersión atmosférica.

Por otra parte, se debe distinguir entre los modos de emisión en operación normal (es decir, una tasa continua desde la fuente plana distribuida o la chimenea), o bien las cantidades dadas que son emitidas en tiempos discretos (Δt de emisión), caso de una emisión accidental o incidental (condiciones en Tabla 1).

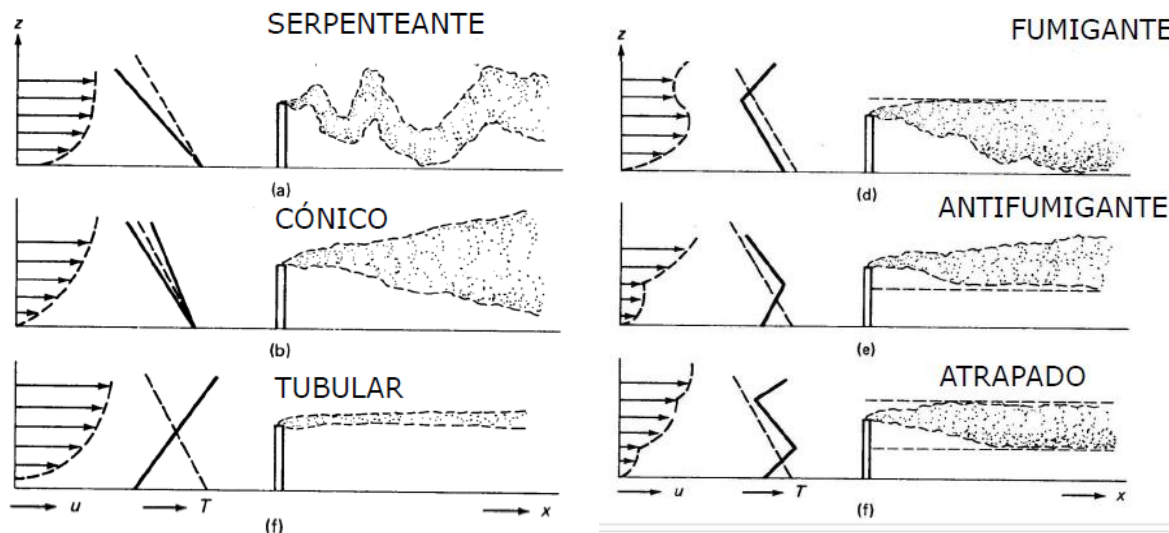


Figura 6. Dispersión de contaminantes: tipos de penachos. (Masters Gilbert M., 2008)

La Figura 6 describe diversos patrones de penachos. En general dadas unas características de chimenea y unas condiciones atmosféricas (*clases de estabilidad*) se establecen paraméricamente los tipos de penacho para los modelos de dispersión.

El patrón de penacho serpenteante se produce en condiciones muy inestables, con un alto grado de turbulencia, cuando el gradiente térmico es mayor que la tasa de cambio adiabática (condiciones superadiabáticas). El penacho cónico es típico de atmósferas neutras o ligeramente estables, mientras que el tubular se asocia a atmósferas estables en ausencia de viento.

En algunas ocasiones se produce la presencia de una o más capas de inversión, que actúan como barrera para la mezcla vertical; es el caso de los penachos fumigante, antifumigante y atrapado. El primero de ellos ocurre cuando el penacho se encuentra por debajo de la capa de inversión, al contrario que el penacho antifumigante, donde la capa

de inversión se sitúa por debajo del penacho. En el fumigante la capa inestable se encuentra debajo del penacho y la estable encima del mismo. Cuando se produce este fenómeno de fumigación, la concentración de contaminantes a nivel del suelo es muy elevada, lo que se puede evitar si las chimeneas son lo suficientemente altas.

El penacho antifumigante, contrario al anterior, se produce cuando la capa estable se sitúa por debajo de la capa de inversión y la inestable por encima de ésta. Este tipo de penacho impide la presencia de concentraciones significativas de contaminante a nivel del suelo. Por último, el penacho atrapado se produce entre dos capas de inversión, lo que provoca que la dispersión de contaminantes quede restringida a un área comprendida entre las dos regiones estables.

Para el submodelo fuente de emisión resulta de interés parametrizar los patrones de penacho en función de las características de la chimenea y los tipos de estabilidad atmosférica.

Dadas unas determinadas características, se establece y parametriza para cada tipo de dispersión un determinado tipo de penacho, Figura 6, ya que no es objeto de este trabajo su modelización hidrodinámica.

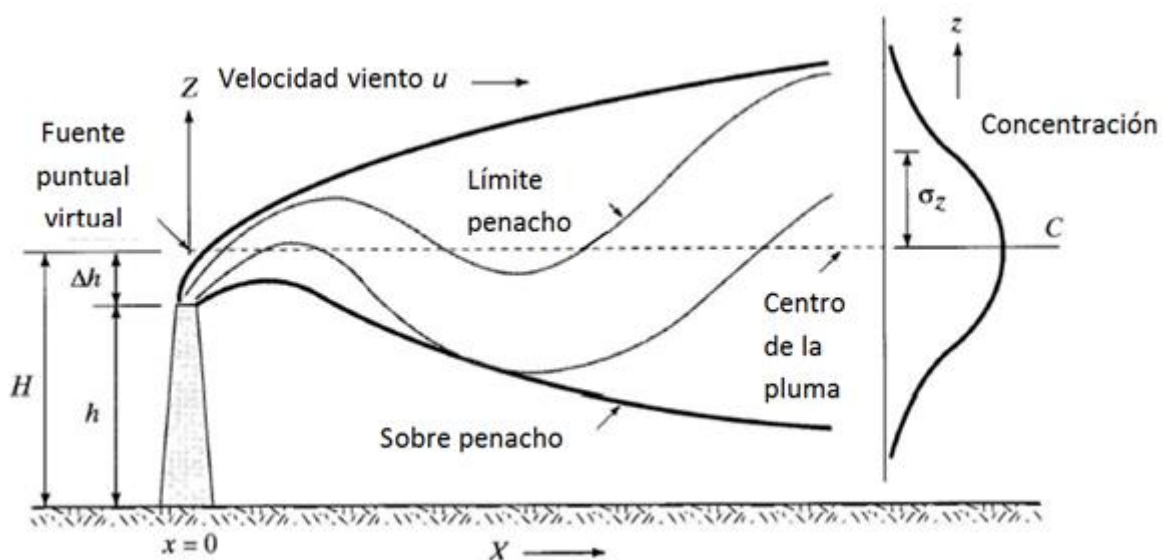


Figura 7. Modelos de dispersión: penacho gaussiano. (Masters Gilbert M., 2008)

La sobreelevación del penacho Δh se determina empleando las Fórmulas de Briggs (Briggs, 1972).



Para condiciones inestables o neutras en la atmósfera (*clases de estabilidad A-D*) se emplean las siguientes expresiones (Masters Gilbert M., 2008).

$$\Delta h = \frac{1,6 \cdot F^{1/3} \cdot x_f^{2/3}}{u_h} \text{ para } x \geq x_f$$

$$\Delta h = \frac{1,6 \cdot F^{1/3} \cdot x^{2/3}}{u_h} \text{ para } x < x_f$$
(1)

Donde, Δh es la sobreelevación del penacho [m], F es el factor de flotabilidad ($m^4 \cdot s^{-3}$), u_h es la velocidad del viento a la altura de la chimenea [$m \cdot s^{-1}$]; x es la distancia del punto a la fuente en la dirección del viento [m] y x_f es la distancia a partir de la cual no hay sobreelevación [m]. Se usa:

$$x_f = 3,5 \cdot x^*$$
(2)

Donde:

$$x^* = 34 \cdot F^{2/5} \text{ para } F \geq 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$

$$x^* = 14 \cdot F^{5/8} \text{ para } F < 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$$
(3)

Siendo el llamado factor de flotabilidad, F :

$$F = g \cdot r^2 \cdot v_s \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)$$
(4)

Donde, g es la aceleración de la gravedad, $9,8 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}]$; r es el radio interior de la chimenea [m]; v_s es la velocidad de salida del gas de la chimenea [$m \cdot s^{-1}$]; T_s es la temperatura del gas a la salida de la chimenea [K] y T_a es la temperatura ambiente [K].

Para condiciones atmosféricas estables, *clases de estabilidad E-F*, se emplean las siguientes expresiones (Masters Gilbert M., 2008):

$$\Delta h = 2,4 \cdot \left(\frac{F}{u_h \cdot S}\right)^{1/3} \text{ para } x \geq x_f$$

$$\Delta h = 5 \cdot F^{1/4} \cdot S^{-3/8} \text{ para } x < x_f$$
(5)

Donde, S es el parámetro de estabilidad [s^{-2}] definido por:



$$S = \frac{g}{T_a} \cdot \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01 \text{ K/m} \right) \quad (6)$$

Siendo $\Delta T_a/\Delta z$ la tasa de cambio de la temperatura ambiente con la altitud [K/m]

Y x_f es la distancia a partir de la cual no hay sobreelevación [m]:

$$x_f = \frac{3,14 \cdot u_h}{S^{1/2}} \quad (7)$$

Se genera un submodelo paramétrico “fuente” en MathCad 14.0 de la siguiente forma:

- Entradas: altura eficaz de la chimenea H , radio interno de la chimenea r , *clase de estabilidad* (A-F), velocidad del viento a la altura de la chimenea u_h , velocidad de salida del gas de la chimenea v_s , temperatura ambiente T_a , temperatura del gas a la salida de la chimenea T_s , distancia del punto a la fuente en la dirección del viento x , gradiente térmico $\Delta T_a/\Delta z$
- Salidas: sobreelevación del penacho gaussiano Δh

3.2. Submodelo de dispersión atmosférica

El modelo de dispersión empleado en la simulación será del tipo gaussiano, existiendo no obstante otros modelos de dispersión más complejos tales como el euleriano o el lagrangiano. El modelo de penacho gaussiano se basa en las siguientes suposiciones:

- El caudal de emisión de la fuente es constante
- La velocidad del viento es constante en el tiempo y con la elevación
- El contaminante es conservativo⁶, esto es, no se desintegra por decaimiento radiactivo, reacciones químicas o deposición en el medio
- No se tienen en cuenta los efectos topográficos

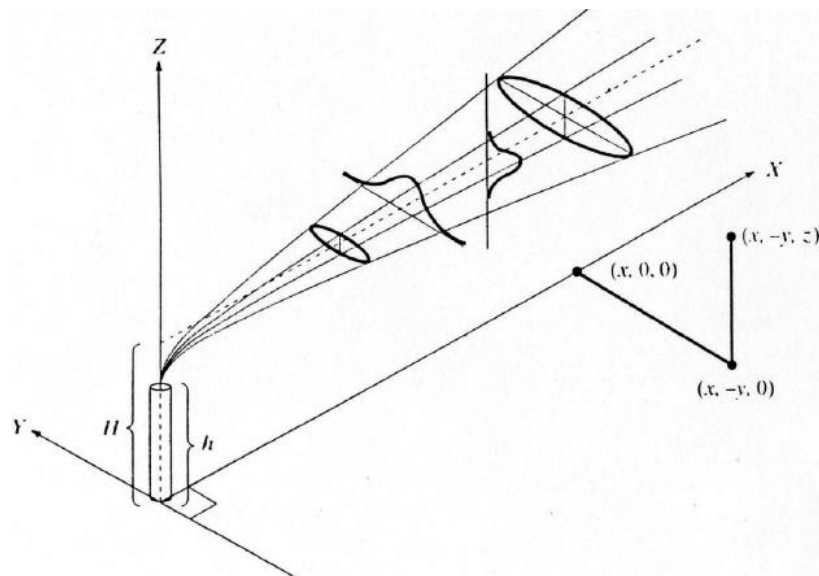


Figura 8. Sistema de coordenadas de la pluma de dispersión que muestra una distribución gaussiana en las direcciones horizontal y vertical. (Turner, 1969)

La ecuación general en tres dimensiones del modelo de dispersión del penacho gaussiano es la que se muestra a continuación⁷:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot u_h \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp \left[-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2} \right] \cdot \exp \left[-\frac{(z - H)^2}{2 \cdot \sigma_z^2} \right] \quad (8)$$

⁶ El tritio es un contaminante no conservativo ya que las especies HT y HTO reaccionan entre sí, no obstante, puede ser considerado como un contaminante conservativo en una primera aproximación, desde el punto de vista de que sólo reacciona entre ambas especies.

⁷ El submodelo de dispersión atmosférica es estacionario; eso significa que para una dirección del viento dada y una velocidad, el mayor alcance de la dispersión diluye el penacho.



Donde: C es la concentración del contaminante en el punto (x,y,z) [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]; x es la distancia en la dirección del viento [m]; y es la distancia horizontal desde el centro de la pluma [m], z es la altura desde el suelo [m]; Q es el caudal de emisión del contaminante [$\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$]; H es la altura eficaz de la chimenea [m]; u_h es la velocidad del viento a la altura eficaz de la chimenea [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]; σ_y es el coeficiente de dispersión horizontal [m] y σ_z es el coeficiente de dispersión vertical [m].

Para calcular la velocidad del viento u a la altura de la chimenea, H [m], se aplica la siguiente expresión:

$$u_h = u_{\text{ref}} \cdot \left(\frac{H}{z_{\text{ref}}} \right)^p \quad (9)$$

Donde: u_{ref} es la velocidad del viento de referencia a la altura del anemómetro [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], H^8 es la altura eficaz de la chimenea [m], z_{ref} es la altura de referencia del anemómetro [m] y p es un factor adimensional que depende de la rugosidad del terreno y de la clase de estabilidad.

Tabla 2. Exponente p para corrección de la velocidad del viento en función de la *clase de estabilidad*. (Peterson, 1978)

Clase de estabilidad	Denominación	Exponente p
A	Extremadamente inestable	0,15
B	Moderadamente inestable	0,15
C	Ligeramente inestable	0,20
D	Neutra	0,25
E	Ligeramente estable	0,40
F	Moderadamente estable	0,60

*Para terrenos llanos, se multiplica p por 0,6

Para calcular estas expresiones es necesario hacer una estimación de los parámetros velocidad del viento, u y coeficientes de dispersión, σ_y y σ_z .

Una de las formas más extensamente empleadas para calcular los coeficientes de dispersión horizontal y vertical es la que se muestra a continuación (Martin, 1976):

$$\begin{aligned} \sigma_y &= a \cdot x^{0,894} \\ \sigma_z &= c \cdot x^d + f \end{aligned} \quad (10)$$

⁸ La altura eficaz H es igual a $H = h + \Delta h$.



Donde las constantes a, c, d y f están tabuladas en la Tabla 3 para cada categoría de *clase de estabilidad*. El parámetro x debe expresarse en [km] mientras que los parámetros σ_y y σ_z deben expresarse en [m].

Tabla 3. Valores de las constantes a, p, b, q en función de las clases de estabilidad. (Martin, 1976)

Clase de estabilidad	$x \leq 1 \text{ km}$				$x \geq 1 \text{ km}$		
	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440,8	1,941	9,27	459,7	2,094	-9,6
B	156	106,6	1,149	3,3	108,2	1,098	2,0
C	104	61,0	0,911	0	61,0	0,911	0
D	68	33,2	0,725	-1,7	44,5	0,516	-13,0
E	50,5	22,8	0,678	-1,3	55,4	0,305	-34,0
F	34	14,35	0,740	-0,35	62,6	0,180	-48,6

Por rigor, se han comprobado los valores de la Tabla 4 con un sencillo software en MathCad, y se concluye que los datos obtenidos son correctos, con la única diferencia de que en la Tabla 4 los valores de los respectivos coeficientes de dispersión σ_y y σ_z aparecen redondeados.

Tabla 4. Coeficientes de dispersión (m) para distintas distancias en la dirección del viento (km). (Masters Gilbert M., 2008)

x (km)	Clase de estabilidad y σ_y						Clase de estabilidad y σ_z					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
0.2	51	37	25	16	12	8	29	20	14	9	6	4
0.4	94	69	46	30	22	15	84	40	26	15	11	7
0.6	135	99	66	43	32	22	173	63	38	21	15	9
0.8	174	128	85	56	41	28	295	86	50	27	18	12
1	213	156	104	68	50	34	450	110	61	31	22	14
2	396	290	193	126	94	63	1953	234	115	51	34	22
4	736	539	359	235	174	117	8369	498	216	78	51	32
8	1367	1001	667	436	324	218	35763	1063	406	117	70	42
16	2540	1860	1240	811	602	602	152712	2274	763	173	95	55
20	3101	2270	1514	990	735	735	243677	2904	934	196	104	59

Los valores en rojo no fueron computados previamente por Gilbert M. Masters.

3.3. Submodelo de química atmosférica y deposición

Como consideraciones previas resulta de interés revisar cualitativamente el ciclo del tritio natural en las distintas capas atmosféricas, sus zonas de retención y el tiempo de residencia medio.

En general, el tritio, en niveles troposféricos, sufre idéntico ciclo de recirculación que el agua. El tritio natural se genera en altas capas de la atmósfera (estratosfera) por efecto de la radiación cósmica. Asumiendo las conclusiones cualitativas de modelos atmosférico-compartimentales simples (en los que se considera la corta semi-vida radiactiva del tritio: 12,3 años (European Commission, 2008)) parte de ese tritio se transfiere a la tropopausa desde niveles más externos, en la que ya pueden existir niveles mayores de vapor de agua provenientes de la troposfera. La tropopausa actúa como trampa fría para condensar o congelar vapor de agua, ahora ya con trazas de tritio tropopáusico, que hacen que éste pueda llegar a la superficie en forma de precipitación lluviosa.

La conclusión importante desde el punto de vista medioambiental es que el tritio natural sigue de manera acorde el ciclo natural del agua en la troposfera después de llegar a ésta desde la tropopausa. Las estimaciones del tiempo medio de residencia del tritio en la troposfera varían de 21 a 40 días (Jacobs, 1968).

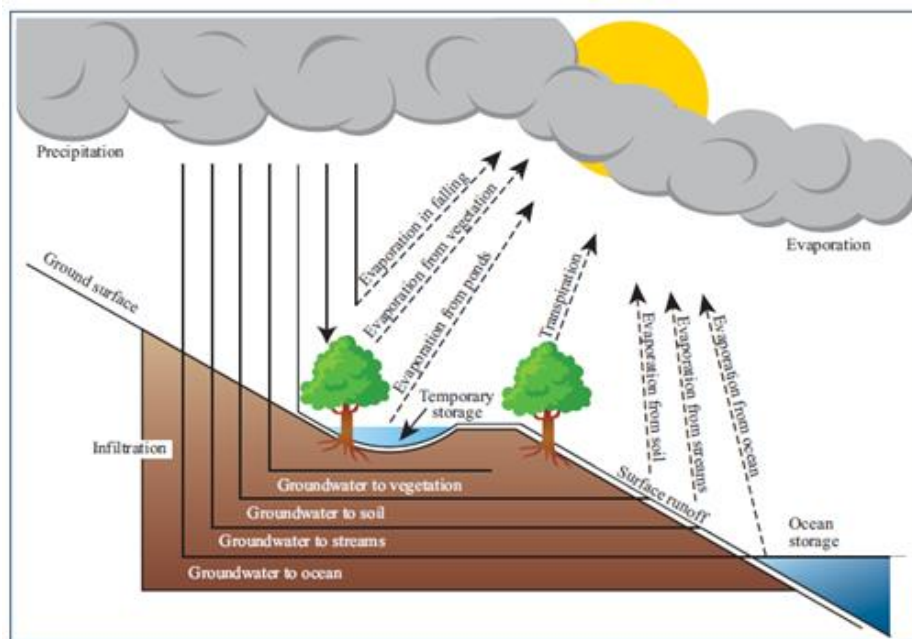


Figura 9. Modelo conceptual que representa el ciclo hidrológico. (Baver, 1956)



El tritio artificial, emitido por una chimenea en condiciones atmosféricas muy muy estables, podría llegar a niveles altos de la troposfera y condensar en la tropopausa en tiempos cortos, formando parte del agua de lluvia y llegando al suelo por precipitación.

Las constantes de equilibrio isotópico se recogen en el *Anexo II. Inputs. Propuesta de bases de datos*. En estas reacciones no se tiene en cuenta la cinética: se considera que las reacciones son casi instantáneas.

Tabla 5. Distribución natural de tritio. (Begemann, 1963)

Compartimento del medio ambiente	Distribución de tritio (%)
Hidrosfera	~ 90
Troposfera	
Vapor de agua (HTO)	0,1
Hidrógeno molecular (HT)	0,02 a 0,2
Metano (CH ₃ T)	< 0,04
Estratosfera	
Agua (HTO)	~ 10
Hidrógeno molecular (HT)	0,004 a 0,007

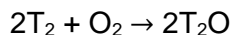
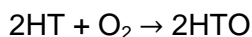
La partición de tritio natural en la atmósfera, procedente de determinadas reacciones nucleares inducidas por la interacción en la estratosfera de las radiaciones cósmicas principalmente con nitrógeno y otros elementos, tales como el oxígeno, es indicativa de la distribución estacionaria en sus formas químicas. Además, el tritio artificial, producido principalmente por las detonaciones nucleares, se distribuye en la atmósfera más o menos de la misma manera que el tritio natural (Jacobs, 1968), siendo la especie más abundante el HTO.

En este submodelo de química atmosférica y precipitación se atiende sólo a las fuentes antropogénicas. En este submodelo juegan un papel importante las propiedades físico-químicas de la atmósfera (presión atmosférica, humedad ambiente - expresada en términos absolutos o relativos -, temperatura, irradiación solar, etc.) y los procesos de dispersión atmosférica (viento, *clase de estabilidad*, etc).

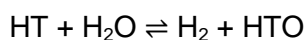
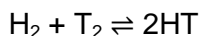
Las especies emitidas desde la fuente se encuentran tanto en formas elementales H₂, HT, T₂ como oxidadas H₂O, HTO y T₂O. Las primeras se pueden considerar como gases secos mientras que las segundas como distintas formas de "agua" en fase vapor. Estas especies son transportadas y dispersadas en función de las condiciones atmosféricas (*clases de estabilidad*). Para un modelo de penacho estacionario sencillo se puede describir la química isotópica con constantes de equilibrio entre las especies



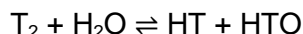
emitidas⁹. En general las formas elementales se oxidan con el oxígeno del aire hacia formas oxidadas:



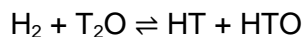
Las principales reacciones de equilibrio isotópicas que se producen en la atmósfera son:



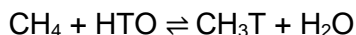
Y su conjugada en equilibrio:



La emisión gaseosa de tritio es fundamentalmente HT y una pequeña fracción emitida en forma emitida T_2 , que al reaccionar por intercambio con el H_2 del aire se transforma rápidamente en HT, pudiéndose oxidar posteriormente a HTO debido a la presencia de vapor de agua en la atmósfera. De manera análoga, la emisión fundamental de vapor de agua tritiada es en forma de HTO, siendo T_2O una pequeña fracción, por lo que se puede descartar en una primera aproximación la reacción de equilibrio:



Otra importante reacción que se produce en la atmósfera es la del intercambio de metano con vapor de agua tritiada para producir metano tritiado.



A partir de los datos de equilibrio y los indicadores ambientales se puede suponer que en la pluma de dispersión es HTO un porcentaje superior al 97%, es HT un porcentaje superior al 2% y, un pequeño porcentaje se reparte entre distintas especies químicas: formas metanoides $\text{C}_x\text{H}_y\text{T}_z$ (en todas sus formas isotopoméricas, del CT_4 al CH_3T , éste último mayoritario por las mismas razones de intercambio).

⁹ Para mayor información véase *Anexo II. Inputs. Propuesta de bases de datos.*

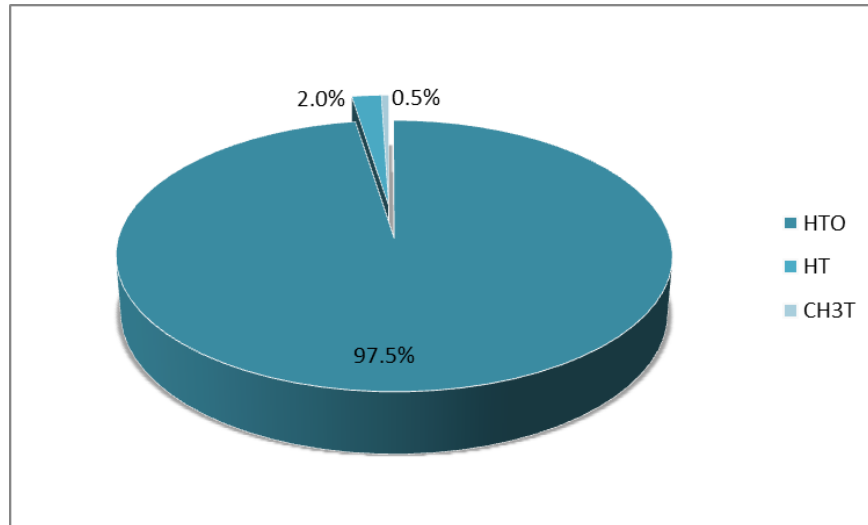


Figura 10. Porcentaje de las formas tritiadas emitidas a la atmósfera.

En la pluma de dispersión los porcentajes de partición precisos ($\pm 1\%$) entre las formas tritiadas dependen, de nuevo, de las condiciones atmosféricas dadas, temperatura y humedad, y pueden calcularse a partir de las reacciones de equilibrio

En general, la interacción del CO_2 atmosférico y otros gases de efecto invernadero (formas ácidas orgánicas $\text{CO}_2 + \text{HT}(\text{O})$, $\text{SO}_x + \text{HT}(\text{O})$, $\text{NO}_x + \text{HT}(\text{O})$, $\text{COV}_s + \text{HT}(\text{O})$) pueden considerarse marginales (ppb), por lo que no se consideran en el presente estudio.

Por todas estas razones, la ecuación (8) resulta:

$$C_{\text{HT}} = 0,02 \cdot C(x, y, z)$$

$$C_{\text{HTO}} = 0,98 \cdot C(x, y, z)$$

(11)

Siendo 0,02 el [%T, HT] (T, H_R) y 0,98 [%T, HTO] (T, H_R) para valores de $H_R < 50\%$. Para valores $H_R > 50$, prácticamente el 100% es HTO.

Una evaluación dosimétrico-ambiental mínimamente precisa en relación al tritio exige la distinción entre las formas químicas HT y HTO. En general los caminos de transferencia a dosis y los *factores de conversión a dosis (DFC)* para el HTO hacen de la consideración simplificada de que el 100% de la forma atmosférica es HTO una hipótesis conservadora, conducente a mayores dosis crónicas.



Una modelización precisa de la interacción de la dispersión de la pluma y su interacción con el terreno exige como entrada datos de la orografía, lo que se denominan *factores de rugosidad* del terreno o *factores de protección*. En principio, y ya que inicialmente el modelo de terreno precede al modelo poblacional, la consideración de suelo plano es conservativa a efectos de dispersión de la pluma y la dosis recibida.

Tabla 6. Rugosidades del terreno en función del tipo de superficie. (Briggs, 1972)

Tipo de superficie		Rugosidad, z_0 (cm)
Ligeramente rugosa	césped	0,1
Moderadamente rugosa	hierba y cereal	0,3-0,15
Rugosa	suburbios	100
	Bosques	20-200
Muy rugosa	ciudades	100-300

La forma numéricamente sencilla de considerar los efectos del terreno es por vía de corrección de las desviaciones verticales (σ_z):

$$\sigma_{zR} = \sigma_z \cdot \left(\frac{z_0}{z_{ref}} \right)^d \quad (12)$$

Donde z_{ref} es una rugosidad de referencia 3 cm; z_0 es la rugosidad (tabulada para distintos tipos de terreno) y d es un exponente entre 0.2 y 0.25. En general muchos autores (Briggs, 1972) asumen baja rugosidad (< 1m) y alta (viceversa).



3.4. Submodelo de transferencia atmósfera-superficie

Una vez que el tritio, principalmente en forma de HT o HTO, es dispersado desde la fuente a través de la atmósfera, se deposita sobre la superficie del terreno, ya sea en el propio suelo o en los vegetales presentes en él. En este proceso median mecanismos físicos de transferencia denominados:

(1) *deposición seca* para las formas HT, CH₃T (respectivamente, T₂ y H₂ y sus reacciones) pues consideramos el HT como un gas seco y para las formas HTO (respectivamente, T₂O y H₂O y sus reacciones) considerando el HTO como vapor de agua (HTO_(v)).

(2) *deposición húmeda* o agua líquida (HTO_(l)) precipitada en forma de lluvia junto con el H₂O.

De las velocidades de deposición o valores de transferencia dependerá el empobrecimiento de la pluma tritiada.

Cuantitativamente, la transferencia de las formas tritiadas (HT, HTO, CH₃T) al terreno desde la pluma se describe con los llamados *coeficientes de transferencia* K_D (m·s⁻¹) o bien con los llamados *factores de deposición* \bar{D}/Q (m⁻²). El flujo transferido al suelo sería igual:

$$\bar{D}_x \text{ (g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} = K_{D(x)} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \cdot C_x \text{ (g} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad (13)$$

Las tasas de deposición o transferencia de las especies varían en órdenes de magnitud entre las especies HT y HTO ($K_{D(\text{HTO})}=10 \cdot K_{D(\text{HT})}$) es decir, que la pluma dispersada se empobrece a mayor ritmo en HTO.

Las tasas de difusión seca, desde la concentración de la pluma en altura al suelo, pueden considerarse un proceso de transferencia difusiva de las especies HT (gas seco) y HTO (vapor) en el aire en las condiciones en que se encuentren las capas bajas de la atmósfera, nuevamente dependientes de la *clase de estabilidad*. Los valores de $K_{D(\text{HT})}$, $K_{D(\text{HTO})}$ pueden estimarse de la siguiente forma:

$$K_{D(x)} = \frac{D_x}{h + \Delta h} \quad (14)$$



Donde D_x es el coeficiente de difusión de la especie en aire [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], computable a partir un modelo cinético-estadístico de *Chapman-Enskog* (Sydney Chapman, 1970):

$$D_{1x} = \frac{3 \cdot k_B \cdot T}{8 \cdot p_0 \cdot \sigma_{1x}^2} \cdot \sqrt{\frac{k_B \cdot T}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_x} \right)}$$

(15)

Donde, p_0 es la presión del aire [Pa], T es la temperatura del aire [K], k_B es la constante de Boltzmann [J/K], m_1 y m_x son las masas moleculares del aire y de la especie (HT, HTO) [kg], respectivamente. El parámetro σ_{1x} se computa como la media del radio molecular de cada una de las especies, $\sigma_{1x} = (\sigma_1 + \sigma_x)/2$ [m].

Los parámetros de la ecuación (15) toman los siguientes valores:

- $P_0 = 10130$ Pa
- $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- $T = 298$ K
- $m_1^{10} = 28,84 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} / N_A = 4,789 \cdot 10^{-23}$ kg
- $m_{HT} = 4 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} / N_A = 6,642 \cdot 10^{-24}$ kg
- $m_{HTO} = 20 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} / N_A = 3,321 \cdot 10^{-23}$ kg
- $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- $\sigma_1 = 0,79 \cdot 2 \cdot 71 \cdot 10^{-12} \text{ m} + 0,21 \cdot 2 \cdot 66 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 1,399 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- $\sigma_{HT} = 2 \cdot 31 \text{ pm} = 6,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
- $\sigma_{HTO} = 2,75 \text{ \AA} = 2,75 \cdot 10^{-9} \text{ m}$

Sustituyendo en (15) resulta: $D_{1HT} = 1,58 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y $D_{1HTO} = 4,21 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Generalmente el transporte de especies isotópicas a través del suelo viene pesado en la proporción entre la viscosidad cinemática (ν) del aire y la difusividad de las especies (D) (número de *Schmidt*).

$$S_C = \frac{\nu}{D}$$

(16)

¹⁰ Para la obtención de las masas moleculares y los radios de las especies se ha consultado la siguiente referencia bibliográfica (WebElements Periodic Table of the Elements).



Nuevamente estas viscosidades del aire se pueden relacionar con las *clases de estabilidad*. En general, para condiciones de referencia y para viscosidades del aire bajas, son los valores de difusividad los que determinan la difusión.

El tiempo característico de difusión se determina mediante la siguiente expresión:

$$\tau_c = \frac{\Delta x^2}{6 \cdot D} = \frac{(h + \Delta h)^2}{6 \cdot S_c \cdot v} \quad (17)$$

Donde τ_c es el tiempo característico de difusión [s], h es la altura de la chimenea [m], Δh es la elevación del penacho [m] y D es el coeficiente de difusión [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Las viscosidades cinéticas del aire son del orden de $1,61 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, con lo cual los números de Schmidt (16) son menores que uno (del orden de 0,1) para el HT, predominando entonces el fenómeno de difusividad. Por el contrario, para el caso del HTO los números de Schmidt son mayores que uno (del orden de 100), por lo que predomina el fenómeno de la viscosidad del aire a efectos de transporte. Sólo se tendrá en cuenta para deposición seca de gas seco el fenómeno de la difusividad para la especie HT.

Cualitativamente, con los valores obtenidos en (15) y sustituyendo en (17), se obtendrían tiempos característicos muy elevados para el HTO respecto del HT. Por este motivo, se desprecia la deposición seca para la especie $\text{HTO}_{(v)}$, teniendo únicamente en cuenta la del HT.

El *factor de transferencia* (K_D) para la *deposición húmeda*, que se podría definir como la constante de proporcionalidad entre la concentración $\text{HTO}_{(l)}$ en la condensación de la nube y el flujo de $\text{HTO}_{(l)}$ al suelo, con dimensiones de $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, puede equipararse a la velocidad con la que cae la gota de agua al suelo, esto es:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h + \Delta h)} \quad (18)$$

En resumen y por simplificación, se considera que la deposición seca se produce únicamente para la especie HT (gas seco) mientras que la deposición húmeda tiene lugar solamente con el HTO (fase líquida).

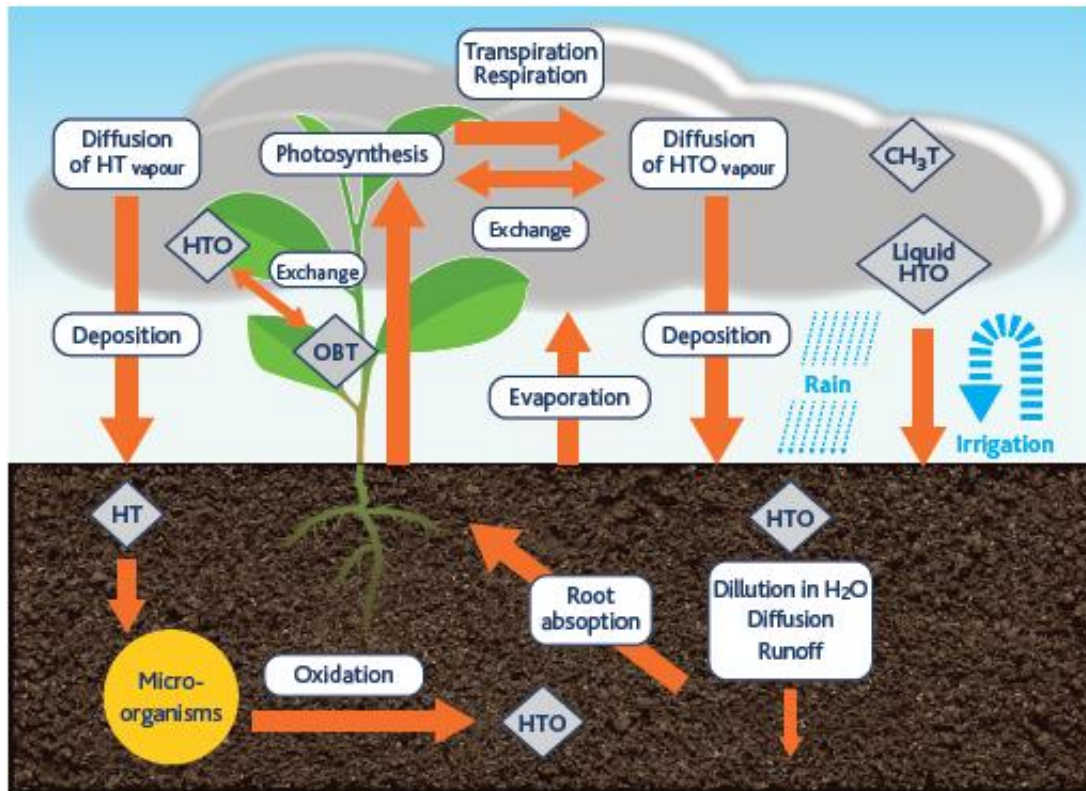


Figura 11. Transferencia de tritio en ambientes terrestres en las interfases aire-suelo-planta. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010)

3.5. Submodelo edafológico

Después de la etapa de deposición, el tritio que permanezca en el aire a niveles bajos, en principio va transferir potencialmente de forma directa dosis por contacto (absorción de la piel) o por inhalación al ser humano. El tritio, al depositarse en el terreno, entra en los caminos de transferencia a dosis a través de las cadenas tróficas (incorporación a aguas de consumo, vegetales, animales, etc): dosis por ingestión.

Las formas tritiadas en el suelo se *absorben* (como humedad del suelo, caso del HTO o como gas disuelto, caso del HT), se *transmiten* (mecanismos de migración como la infiltración) o puede *re-emitirse* por *evaporación* o *transpiración* a la atmósfera, lo que supone un camino potencial de transferencia del tritio, en sus formas (HT gas, HTO vapor), al aire. Nuevamente para dosis por inhalación o contacto. En general, el suelo tiene un efecto netamente oxidante, por acción microbiana (bacterias que presentan enzimas tipo hidrogenasa), disminuyendo las cantidades de HT en el aire en contacto con el suelo y re-emitiendo en otras proporciones HTO vapor, a modo de humedad.



En general, la acción de oxidación bacteriana supone desplazar los equilibrios de la reacción $\text{HT} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{HTO}$ entre cuatro o cinco órdenes de magnitud (Jacobs, 1968). Las cinéticas de reacción que introduce la acción microbiana oxidativa en el suelo son rápidas, del orden de días.

Cuando se habla de suelo, se refiere a la superficie terrestre, dos tercios de las cuales es agua. En el caso de la superficie ocupada por el agua (océanos, mares, ríos, pantanos, etc), los mecanismos de transferencia son de enorme dilución y de re-emisión por evaporación. En el caso de las grandes masas de agua oceánicas, éstas juegan un papel medioambientalmente muy notable desde el punto de vista radiológico de sumideros y absorbentes de dosis a escala planetaria.

En los modelos de suelo para absorción de HT y HTO se distinguen tres tipologías:

- Terreno (seco/húmedo)
- Vegetación
- Agua (mar, ríos o lagos)

La vegetación absorbe vapor de agua (H_2O o HTO) en sus zonas expuestas (hojas, tallo) en proporciones muy superiores a las que absorbe gas seco (H_2 , HT), en un factor cuatro. *Spencer* asume que la velocidad de deposición debida a la absorción directa de HT por las hojas de las plantas oscila entre 10^{-7} y $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (F. S. Spencer, 1986). Otros autores (R. Kirchmann, 1986) indican que la absorción de HTO por las hojas de los vegetales es cuatro veces superior (entre $4\cdot 10^{-7}$ y $4\cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) que la debida al HT. Por este motivo, en este trabajo no se desprecia la absorción de HT por la vegetación.

La cantidad de tritio incorporado por las plantas desde la atmósfera a través de sus zonas expuestas (hojas) se rige por la ecuación de *Belot* (Y. Belot, 1979) modificada en este trabajo para considerar los términos de transferencia al subsuelo:

$$\mu \cdot \frac{dC_{\text{veg}}}{dt} = \frac{1}{r_t} \cdot \left(\chi_a - \frac{\rho}{\alpha} \cdot C_{\text{veg}} \right) + J_D \cdot T \cdot \beta$$

(19)

Donde: μ es el cantidad de agua por área foliar [$\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}\cdot\text{m}^{-2}$]; C_{veg} es la concentración relativa de HTO respecto a H_2O [$\text{g}_{\text{HTO}}\cdot\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$]; dt es el diferencial de tiempo [s]; r_t es la

resistencia total, suma de la resistencia de los poros, orificios o estomas de las hojas (r_p) y la resistencia atmosférica que opone la propia planta (r_a) [$s \cdot m^{-1}$]; χ_a es la concentración de tritio en el aire [$g_{HTO} \cdot m^{-3}$]; ρ es la densidad del vapor de agua en el aire [$g_{H_2O} \cdot m^{-3}$], α es la relación isotópica entre el peso molecular del HTO y del H_2O , cuyo valor es de 20/18 [-], J_D es flujo de deposición [$g_{HTO} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], T es el factor de transmisión al subsuelo [-] y β es la fracción del agua transferida que es capaz de ser absorbida por las plantas o una superficie efectiva de raíz respecto a la superficie de infiltración [-].

Atmósfera

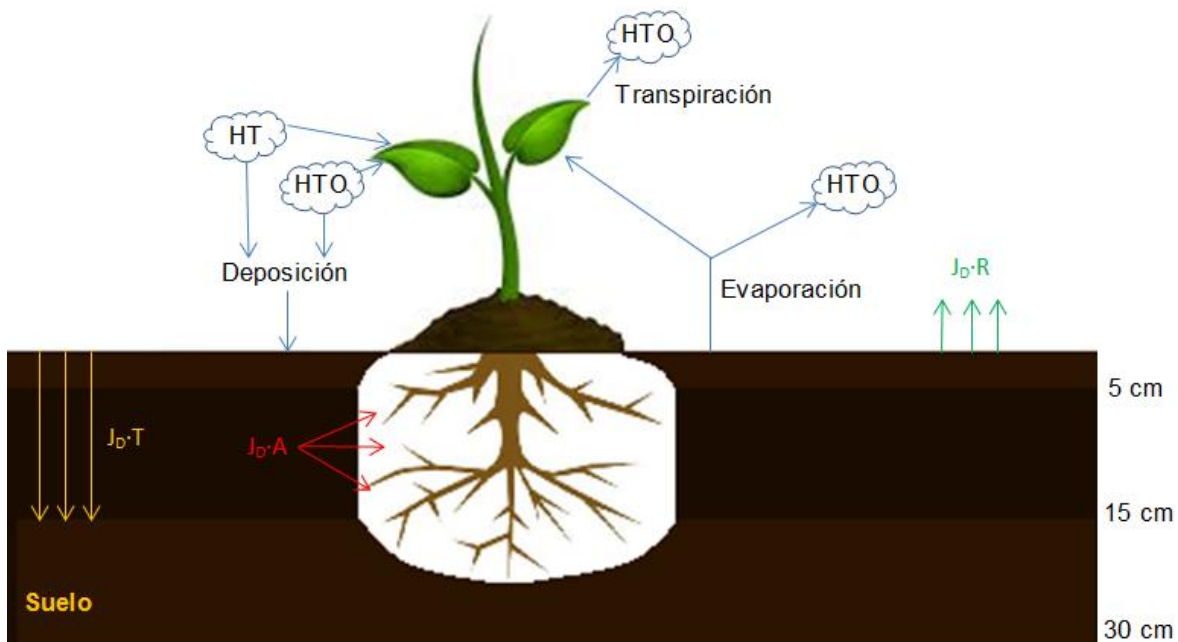


Figura 12. Esquema de los posibles caminos (absorción, transmisión y re-emisión) que sigue el tritio en forma de HT o HTO una vez que se deposita en el suelo. En los primeros centímetros del suelo, el hidrógeno tritiado HT depositado se transforma rápidamente en agua tritiada HTO por la acción de los microorganismos (los microorganismos que presentan una mayor actividad oxidante son los *Actinomicetos*, una familia de bacterias *Gram-positivas* que está presente en un 94% de los suelos cultivados y en un 84% de los suelos naturales (Mayol, 2004)) tales como bacterias, musgos y microorganismos protozoarios o por el agua contenida en el propio suelo, proceso conocido como oxidación. Como consecuencia, todo el tritio depositado en el suelo (HT y HTO), se encuentra finalmente en la forma de HTO. Esto permite al tritio participar en todos los procesos relativos al ciclo del agua, tales como la evapotranspiración (re-emisión a la atmósfera), absorción a través de las raíces de las plantas y transporte (infiltración) al subsuelo, lo que le permitiría alcanzar el nivel freático incorporándose a las aguas subterráneas y, por consiguiente, a las aguas de consumo (problema de salud pública). Este sería uno de los principales mecanismos de incorporación de HTO al ser humano, a través de la ingestión de bebidas tritiadas. Estos intercambios se ralentizan cuanto más seco sea el suelo y con la presencia de vegetación.



En la Figura 12 se muestran los posibles caminos que sigue el tritio (en forma de HT gas o HTO vapor) una vez es depositado (*deposición seca* o *deposición húmeda*) en el suelo. Estos caminos son la transmisión (T) a niveles inferiores del subsuelo, la absorción (A) por las raíces de las plantas o su re-emisión (R) por evapotranspiración a la atmósfera. La suma de estos tres mecanismos debe ser igual a la unidad.

$$A + T + R = 1 \quad 0 \leq A, T, R \leq 1 \quad (20)$$

En general, a efectos de transferencia de tritio al suelo-vegetación y los caminos finales de transferencia a dosis, se debe considerar un sistema dinámico para los distintos factores A, T, R que vienen a pesar las transferencias de la absorción en el suelo (A), la transmisión a niveles de suelo inferiores (T) y la re-emisión a la atmósfera (R) entre:

- El flujo de deposición J_D , con dimensiones $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y su re-emisión de la superficie ($R\cdot J_D$)
- Su conversión química en la primera capa superficial del suelo y su re-emisión en las distintas formas tritiadas (HT, HTO)
- La incorporación de una fracción β desde niveles inferiores de suelo ($\beta\cdot T\cdot J_D$) que pasa a ser absorbido por las raíces de las plantas y se incorpora a éstas en concentraciones C_{veg}
- Los balances de absorción y evapotranspiración que tienen lugar en las hojas del vegetal, ecuación (19)

El porcentaje de tritio re-emitido (R) a la atmósfera está íntegramente ligado al efecto día-noche, siendo éste mayor en función de la radiación solar. Además, las tasas de re-emisión son superiores en las zonas aéreas de la planta (hojas) que en el suelo, debido a que el índice de área foliar (LAI) en los vegetales es mayor que la unidad.

La cantidad de tritio en forma de HTO absorbido (A) por las raíces de las plantas está limitada por el *punto de marchitamiento*, en el cual las raíces no pueden incorporar más agua. Las raíces de las plantas absorben agua en las siguientes proporciones: un 20% de la zona superficial o nivel I (de 0 a 5 cm), repartiéndose el resto 80% entre los niveles II (de 5 a 15 cm) y III (de 15 a 30 cm de espesor).



Cabe destacar como superficie vegetal el caso de la hierba, cuya tasa de re-emisión es mucho mayor que para el resto de vegetales debido a que la cantidad de agua de la que puede disponer es el doble (40%) que para el resto de vegetales (Mayol, 2004)¹¹.

La Figura 12 describe de forma general el esquema dinámico descrito.

El movimiento o transmisión (T) del agua subterránea en el suelo está gobernado por la *Ley de Darcy*:

$$Q = k \cdot A \cdot i = k \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (21)$$

Donde: Q es el caudal que atraviesa el suelo permeable [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]; k es el factor de transferencia: la permeabilidad o conductividad hidráulica [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]; A es la sección transversal [m^2]; i es el gradiente hidráulico [-]; Δh es la diferencia de potencial entre A y B [m] y L es la distancia entre A y B [m].

A la hora de tratar y clasificar los tipos de suelo desde el punto de vista radiológico, no se entra en su *clasificación taxonómica* para calificar la migración de radionucleidos en cada uno de ellos sino en sus tipologías, en lo que se denomina la *clasificación ingenieril*, que permite establecer, para tres tipos de suelos generales, unos comportamientos cuantitativos diferenciales para la migración y transferencia de las distintas especies tritadas.

Tabla 7. Clasificación ingenieril de un suelo. (USCS)

Clasificación ingenieril de un suelo		
Tipos de suelo	Ejemplos	Parámetros
Suelos de grano grueso	Gravas y arenas	R (↓↓) A (↓↓) T (↑↑)
Suelos de grano fino	Limos y arcillas	R (↑↑) A (↑↑) T (↓↓)
Suelos altamente orgánicos	Turba, suelos cultivables	R (↓↑) A (↑↑) T (↓↓)

¹¹ El tritio puede ser transformado, por acción de la fotosíntesis, en tritio orgánico u OBT (*Organically Bound Tritium*). Además, puede ser ingerido directamente por los animales presentes en la zona o incluso por el ser humano. Esto toma especial importancia en el caso concreto de **Asturias**, donde la hierba es el principal camino crítico de transferencia a dosis a los pastos asturianos, incorporándose tanto a la leche como a la carne de las vacas presentes en la dieta humana y, posteriormente, siendo ingerida por las cadenas tróficas de la población.



Desde este punto de vista puramente físico, los parámetros del suelo que gobiernan los mecanismos de transporte de las especies tritiadas son:

- Humedad
- Temperatura
- Porosidad/tortuosidad
- Densidad
- Química propia del suelo, etc.

Cualitativamente cabe hacer una distinción entre los suelos secos, donde predominan los fenómenos de transmisión al subsuelo y re-emisión a la atmósfera, y suelos húmedos, donde el agua queda retenida por capilaridad en los microporos, favoreciendo el fenómeno de absorción a través de las raíces de las plantas, Tabla 7.

Otro proceso de eliminación de tritio en la atmósfera es la propia desintegración radiactiva del radionucleido, siempre presente. Los tiempos de decaimiento (semivida radiactiva) para el tritio 12,3 años (European Commission, 2008) son instantáneos comparados con los tiempos climatológicos o geológicos.

En este punto y a nivel de este submodelo edafológico, se debe analizar con cierto rigor lo que se denominan los *camino de transferencia a dosis*. Tanto a nivel de atmósferas de superficie (dosis de contacto o inhalación), como a nivel de los procesos de transferencia que tienen lugar en suelos de cultivo, y en particular para estos modelos deterministas sencillos, se deben considerar esquemas de transferencia de tritio que suponen alcanzar su incorporación en el ser humano.

Desde el punto de vista del impacto dosimétrico y del cálculo final de dosis tempranas y crónicas a la población, los suelos más penalizantes son los suelos orgánicos y, en particular, los cultivables (Mayol, 2004).



3.6. Submodelo de transferencia a dosis al ser humano (OBT)¹²

En este punto se debe incidir en la diferencia entre lo que se denominan *Dosis tempranas* y *Dosis crónicas*. Las *dosis tempranas*, de duración aproximada de 7 días (aunque este valor depende de parámetros atmosféricos), son las que afectan a la población próxima al accidente, causando efectos radiológicos inmediatos sobre la salud, mientras que las *dosis crónicas*, cuya duración varía desde meses hasta años, son aquellas cuyos efectos radiológicos se extienden y se hacen permanentes en largos periodos de tiempo.

Como se ha descrito, el tritio es un emisor beta puro de baja energía; la energía máxima de los electrones emitidos del decaimiento del tritio es de 18,6 keV (promedio de 5,7 keV). Por lo tanto, el alcance máximo correspondiente es aproximadamente de 6 μm en el agua o el tejido biológico, siendo el espesor de la epidermis y la dermis de la piel humana de 20-100 μm y de 1-3 mm, respectivamente (C.Boyer, 2009). Como consecuencia, el tritio podría causar daños a los seres humanos sólo cuando está presente en el interior del cuerpo humano, como inhalado en la respiración (pulmones) o como ingerido en formas líquidas (líquidos de consumo) o alimentos contaminados.

Afortunadamente, el tiempo que permanece el tritio en el cuerpo humano es corto. En el caso de la absorción de agua tritiada, el tiempo de residencia medio de una molécula de agua en el cuerpo humano es aproximadamente de 11 días, eliminándose a través de la sudoración y la orina. Es en ese tiempo en el que el decaimiento radiactivo del tritio dejaría sus dosis internas¹³.

En el caso del tritio inhalado presente en el aire, en forma de HT gas o HTO vapor, los tiempos de residencia son breves (segundos de inspiración-espирación) y sólo una fracción humidificada en los pulmones dejaría dosis internas por inhalación. Aun así los volúmenes inhalados pueden ser grandes. El proceso de la respiración elimina vapor de agua tritiada en fracciones muy importantes, muy superiores a las cantidades inhaladas (de factores de aire inspirado de 0,5% a factores de aire exhalado de 6,2%). Prácticamente el tritio inhalado en forma de HT es inspirado y exhalado, junto con cantidades de vapor de agua (H₂O, HTO) muy superiores a la atmósfera.

¹² OBT: *Organically Bound Tritium*

¹³ El tritio incorporado por ingestión en forma de HT se transforma en el tracto gastrointestinal, por acción bacteriana, en HTO: cinéticas de 50% oxidación al día (B. F. Peterman, 1985; R. Hill, 1993).



Una fracción pequeña del tritio incorporado a los organismos, a través de sus procesos metabólicos, se fija orgánicamente. Este es el llamado “*Tritio OBT (Organically Bound Tritium)*”. En el caso de las plantas este tritio entra en los procesos fotosintéticos, pudiendo entrar en las cadenas tróficas en el caso de cultivos y en el caso de los animales, fijándose en los tejidos vivos.

El estudio de tritio OBT representa hoy por hoy uno de los temas de investigación de mayor interés en el campo de la *Dosimetría Ambiental* y los estudios de *Física de la Salud* por la enorme relevancia que estos estudios biofísicos suponen para el estudio del impacto ambiental de instalaciones que manejan importantes cantidades de tritio.

En general el ciclo orgánico del tritio, más allá de su decaimiento radiactivo y su radioquímica específica (véase *Anexo II. Inputs. Propuesta de bases de datos*), es análogo al del hidrógeno en los organismos vivos, lo que hace que se fije en múltiples formas por intercambio¹⁴. Su residencia en forma de OBT en el cuerpo humano puede variar entre cortos periodos de tiempo o fijarse y permanecer durante años, en cuyo caso los efectos dosimétricos serían muy relevantes e incluso transgeneracionales.

Tabla 8. Formas ligadas de tritio y sus principales características. (Mayol, 2004)

Formas de tritio ligadas	
TFWT	Se metaboliza como el agua normal en el ciclo interno del organismo
e-OBT	Se fija de manera inestable y puede eliminarse por intercambios metabólicos
t-OBT	Se fija de manera estable pero no puede eliminarse por intercambios metabólicos

Dentro del organismo, el agua tritiada puede estar en forma de agua libre o de agua normal *TFWT (Tissue Free Water Tritium)*. También por reacciones de intercambio se podría intercambiar hidrógeno y tritio entre distintas moléculas orgánicas; si así fuese, ese tritio que es fácilmente intercambiable se podría recuperar por intercambio, *e-OBT (Exchange OBT)*. El HTO libre y el OBT intercambiable sufren transformaciones químicas y pueden ser eliminados por parte del organismo.

El *t-OBT (Tightly OBT)* es el que se acostumbra a llamar OBT y es el que deja efectos dosimétricos biológicamente dañinos. El t-OBT es el que se fija de manera permanente en las estructuras orgánicas de las células ADN, ARN intracelulares. En general el tritio se fija a moléculas orgánicas tipo glucosa, carbohidratos, timidina o

¹⁴ Por esta razón el tritio es un trazador común de uso en farmacología.



leucina (Mayol, 2004). Los datos recientes de residencia en el organismo como t-OBT se están revisando al alza, es decir, a mayores dosis crónicas. Todas estas formas de tritio ligado pueden convivir en un mismo organismo.

Desde el punto de vista cuantitativo, el interés fundamental se centra en establecer los *factores de conversión a dosis* desde las formas de tritio ligadas (TFWT, e-OBT, t-OBT).

En los últimos años, un enorme número de estudios han focalizado su atención en el cómputo de los *factores de conversión a dosis (DCF)* de las distintas formas ligadas, siendo éste un tema de un enorme interés científico, controversia y escrutinio público.

Las guías reguladoras actuales (ICRP-67, 1989; ICRP-71, 1995; ICRP-72, 1995) están en permanente revisión de las fracciones de conversión de HTO incorporado a formas de OBT y de los *factores de conversión a dosis crónicas* del OBT en diversos tejidos.

3.6.1. Formación de OBT vegetal

Interesa conocer las fracciones de TFWT, e-OBT y t-OBT que se incorporan a la planta de manera permanente y que, o bien sirven para fijar tritio orgánico en las condiciones de intercambio que la planta establece con el medio ambiente, o bien suponen un aporte en la cadena trófica hacia los animales o hacia el propio ser humano. La ecuación de *Belot* (19) aplicaría para el TFWT. Resulta de interés establecer en qué fracciones o proporciones dicho TFWT se transforma en t-OBT.

Algunos estudios (L. R Anspaugh, 1975) experimentales con 8 especies distintas de plantas y 25 tipos de vegetales de hoja correlacionan la cantidad de tritio fijada en las hojas con la concentración en aire de HTO y vapor de agua.

$$C_{\text{HTO}}^{\text{hoja}} = \frac{[\text{HTO}]}{[\text{H}_2\text{O}]} \cdot 0,5$$

(22)

Más allá de los factores que afectan al término fuente de incorporación a la planta, la transformación de las formas tritadas en t-OBT en la planta dependerá de manera fundamental de la actividad metabólica de la planta, es decir, de su acción fotosintética.

Dicha actividad depende esencialmente de las etapas de crecimiento de la planta, que comúnmente se distribuyen en tres épocas fundamentales de desarrollo.

La formación de t-OBT depende de la actividad fotosintética y de la fracción de materia orgánica de la planta, por lo que, para una emisión dada, el momento de desarrollo de la propia planta tiene una incidencia muy importante en las dosis crónicas.

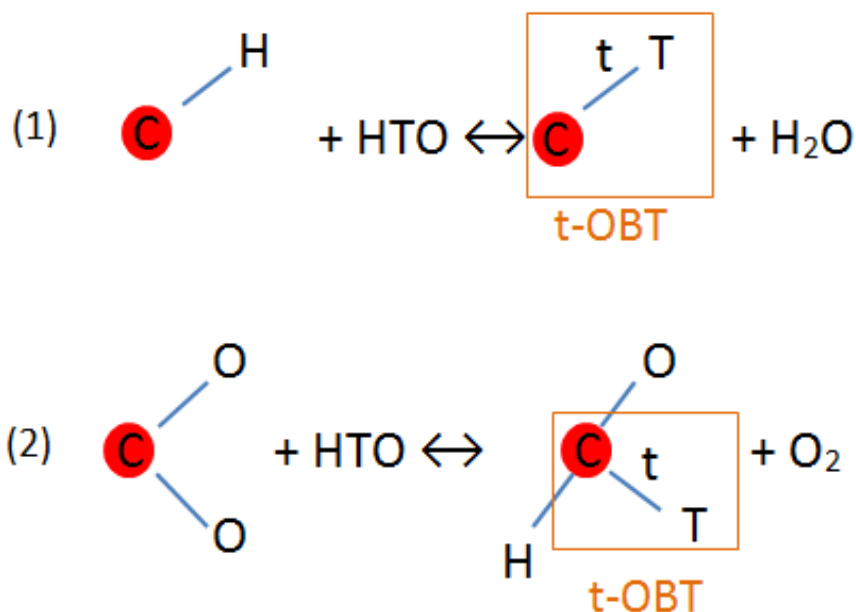


Figura 13. Vías químicas de formación de t-OBT. La primera (1) de ellas es una reacción de intercambio mientras que la segunda (2) es por la acción fotosintética. Estas reacciones pueden ser reversibles, es decir, de transformación de t-OBT a HTO para evapotranspiración en las hojas del vegetal.

En general, dada una planta, las dos formas de conversión de la Figura 13 operan de forma distinta en la raíz y en las hojas. Dentro del propio vegetal se podría incluso compartimentalizar la transformación de TWFT a OBT. Obviamente la segunda reacción se produce en las hojas mientras que las conversiones por intercambio se producen de manera natural en los distintos niveles del subsuelo y raíces. En general se puede asumir un factor tres entre la transformación de HTO libre a OBT en las hojas respecto a las raíces.

En la formación del t-OBT en forma de carbohidratos (reacción (2) Figura 13) el parámetro fundamental es la radiación solar, que tiene una influencia directa en las tasas de conversión.

En general los frutos procesan grandes cantidades de agua, una pequeña parte de la cual es TWFT que convertirían a e-OBT o t-OBT por intercambio, reacción (1) Figura 13. La conversión es muy variable dependiendo del tipo de árbol y de fruto.

Estas reacciones pueden ser reversibles, es decir, de transformación de t-OBT a HTO para evapotranspiración en las hojas del vegetal.

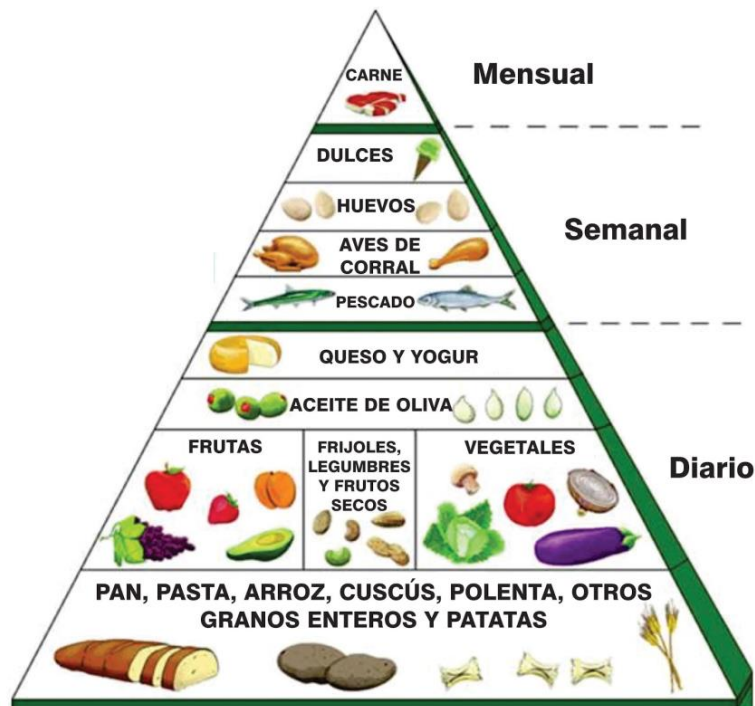


Figura 14. Esquema dieta mediterránea a efectos de consideración de entradas de vegetales de consumo. (Google)

Establecidas las entradas de consumo de vegetales y frutos en las especies animales, y en particular el ser humano, se asignan unas fracciones de t-OBT en las partes consumibles para el cómputo de los respectivos *factores de conversión a dosis (DCF)*, Figura 14.

Los vegetales más consumidos por la especie humana son, por este orden: arroz, trigo y patatas, seguidos de frutas y legumbres. Son los vegetales de hoja de consumo humano, explotados por la agricultura, los que presentan potenciales *camino de transferencia a dosis* por retener directamente t-OBT en sus partes consumibles, y en particular, vegetales como la lechuga, coliflor, etc. En el caso de las patatas y otros tubérculos la cantidad fijada de t-OBT es inferior, según se ha indicado anteriormente.

Para las evaluaciones dosimétricas de los *caminos de transferencia a dosis* se acostumbra a establecer una clasificación de: (1) vegetales de hoja, (2) hierba, (3) patata, (4) trigo y (5) arroz. En Asturias resulta de mayor interés realizar estudios en cultivos de maíz.

En la conversión efectiva de tritio t-OBT en las hojas resulta fundamental la fase de desarrollo en la que ésta incorporación se produce y el contenido de materia orgánica respectivo de la hoja (ejemplo, 10% en una lechuga y 20% en la hierba).

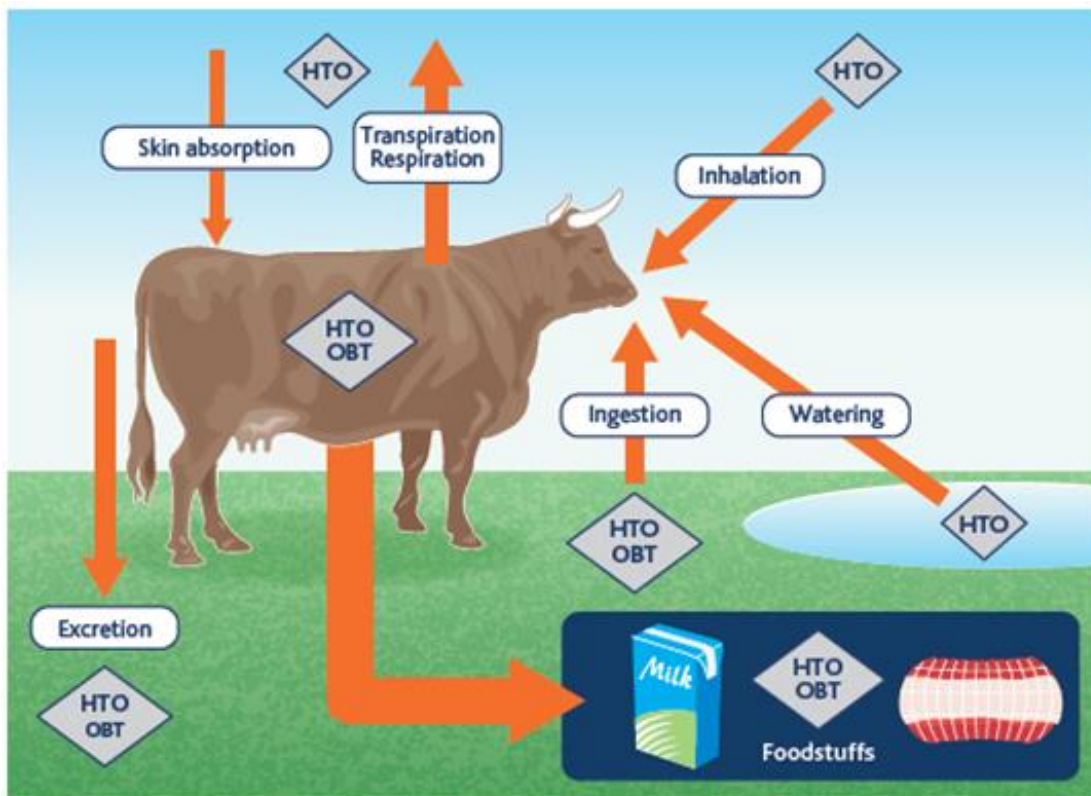


Figura 15. Transferencia de tritio en ambientes terrestres en los animales, incluida la transferencia a los productos alimenticios. En condiciones normales la concentración de HTO vacuno y leche se calculan conociendo la cantidad de forraje, agua, tasa de respiración y absorción por la piel, así como la concentración de HTO de cada componente de forraje. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010).

3.6.2. Incorporación de OBt al animal

El vacuno y sus productos derivados es la entrada más importante a ser considerada en la dieta europea, y de manera obvia para el Principado de Asturias. Así, en los análisis de transferencia a dosis se debe considerar la propia dieta del rumiante que incorporaría tritio de forma eficiente y lo transferiría a la cadena trófica humana. Otra



fuerza importante de incorporación de tritio, tanto al animal como al ser humano, es la propia agua de consumo. Para éstas, se debe hacer una distinción entre su origen como agua superficial o freática. Por más que la leche y derivados sean una vía de eliminación eficiente del tritio incorporado al animal, éstos representan una vía de incorporación a la dieta humana. La consideración de otras vías animales en la dieta dirige a consumo de carne de ave, siendo principal el maíz en la dieta de éstas.

Los animales reciben también dosis por contacto (absorción por la piel) y por inhalación. Se asumen factores por contacto de 1,5 respecto a la dosis por inhalación (ICRP-30, 1980; Osborne, 1966).

En condiciones normales la concentración de HTO vacuno y leche se calculan conociendo la cantidad de forraje, agua, tasa de respiración y absorción por la piel, así como la concentración de HTO de cada componente de forraje, Figura 15 (Raskob, 1991).

$$[\text{OBT}] = [\text{HTO}] \cdot \frac{[\text{H}]_{\text{C-H}}}{2 \cdot [\text{H}_2\text{O}] + [\text{xH}] + \dots} \cdot \alpha \quad 0 < \alpha < 1$$

(23)

A la razón $[\text{OBT}] \cdot [\text{HTO}]^{-1}$ se le denomina *SAR* (*Specific Activity Ratio* o *Tasa de Actividad Específica*), siendo α la fracción de intercambio.

Todos los caminos de transferencia a dosis a considerar son:

- HTO (hierba) → HTO (animal)
- OBT (hierba) → OBT (animal)
- HTO (animal) → HTO (hierba)
- OBT (animal) → OBT (hierba)
- HTO (animal) → HTO (leche)
- OBT (animal) → OBT (leche)

En el proceso de digestión del animal se puede reconvertir OBT en HTO, que puede ser re-emitado a la atmósfera (sudoración, transpiración). Algunos autores estiman que el 1,5% de la ingesta de tritio por la vaca es transferida a un litro de leche (J. van den Hoek, 1979; D. G. Potter, 1972)



El flujo de eliminación de tritio por parte del animal es vía respiración (15%), producción de leche (20%) y secreción (65%) (Mayol, 2004).

Se realiza un modelo animal para el caso concreto de la vaca, donde:

- Tasa de respiración del animal $130,0 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$
- Tasa de absorción por la piel $65,0 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de agua diario $1,75 \text{ l} \cdot \text{día}^{-1}$
- Contenido de agua de la vaca 70% (38,9 kg de H)
- Contenido en materia orgánica de la vaca 30% (11,5 kg de H)
- Peso de la vaca 500 kg
- Densidad animal $250 \text{ vacas} \cdot \text{km}^{-2}$

3.6.3. Modelo socioeconómico (humano)

El modelo dosimétrico global distingue tres capas:

- (1) el modelo de dispersión atmosférica
- (2) los modelos de transferencia en el terreno y a sus especies vivas
- (3) el modelo socioeconómico

Por modelo socioeconómico se entiende: la distribución entre territorio rural y territorio urbano, las distribuciones demográficas respectivas, sus parámetros de consumo (alimentación) y otros hábitos socioculturales (exposición natural).

Un amplio número de factores, en los que por primera vez interviene el factor humano, aparecen en un modelo dosimétrico-ambiental.

Con todos estos parámetros se puede cerrar un modelo dosimétrico fenomenológicamente muy sofisticado con el que calcular las dosis al hombre, parámetro de interés en la evaluación dosimétrica final.

En el ser humano, las cantidades de HTO se distribuyen por todo el agua del cuerpo de manera uniforme, con una muy corta retención comparada con el ciclo interno del OBT. Se estima que una molécula de agua tritiada reside en el cuerpo humano durante un periodo aproximado de 11 días. El t-OBT se fija de manera muy heterogénea en los órganos debido a los muy distintos tiempos metabólicos de cada órgano.



El tritio orgánico OBT, que representa aproximadamente el 10%, se mantiene dentro del cuerpo humano durante aproximadamente 30 días. Una pequeña fracción de tritio orgánico permanece en los tejidos de grasa o colágeno durante aproximadamente 1.000 días (C.Boyer, 2009; Crawford-Brown, 1984).

Hasta la fecha todavía no se conoce claramente la distribución de tritio en el hombre, por no haberse dado situaciones reales que permitiesen justificar esta experimentación.

El cálculo de la *Dosis Equivalente Efectiva Comprometida* para un individuo tipo se puede computar como una proporción entre los distintos *factores de conversión a dosis* (α) y la cantidad de tritio no intercambiable, t-OBT, incorporada al individuo:

$$\langle \overline{CEDE} \rangle_{\text{año}} = \alpha \cdot [t\text{-OBT}]_H \tag{24}$$

No se conoce con certeza cuál es la vía preferente para la conversión de HTO libre a t-OBT. No obstante se considera que la mayor parte de t-OBT es transferida preferentemente al cuerpo humano a través de las cadenas tróficas (ingestión de alimentos contaminados y bebidas tritadas) mientras que una pequeña fracción se debe al HT y HTO atmosféricos que posteriormente se convierten en OBT.

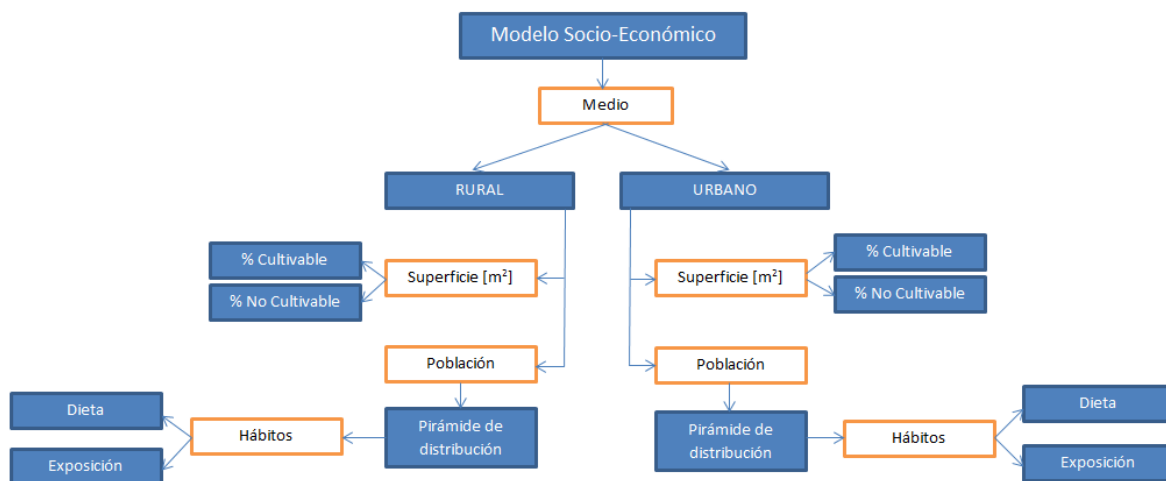


Figura 16. Parámetros principales a considerar en el modelo socioeconómico.



Productos	Cantidad	Grupo de edad
Leche y productos diarios (l·año ⁻¹)		
Vaca	148	2-7 años
Cabra y oveja	47	7-12 años
Vegetales de hoja (kg·año ⁻¹)	22	>17 años
Fruta, verduras y cereales (kg·año ⁻¹)	237	>17 años
Carne (kg·año ⁻¹)		
Vaca (cerdo y ave)	64	7-12 años
Oveja y cordero	4	>17 años
Pescado (kg·año ⁻¹)	25	>17 años
Marisco (kg·año ⁻¹)	8	>17 años
Agua de consumo (l·año ⁻¹)	912,5	>17 años

Tabla 9. Tasas de consumo promedio de la población española. (A. M. Requejo)

3.6.4. Cálculo determinista CEDE: individuos más expuestos (MEI)

Descritos cualitativamente los parámetros que intervienen en los mecanismos de emisión, dispersión y transferencia en los modelos ambientales, con especial interés en los mecanismos que determinan los *factores de conversión a dosis (DCF)* y los caminos críticos a las dosis potenciales máximas, se procede a la evaluación dosimétrica-ambiental del tritio y de sus formas al ambiente y a la población expuesta.

La formulación de un modelo dosimétrico-ambiental de tipo determinista conservativo para las emisiones de formas de tritio, HT y HTO, permite identificar el conjunto de magnitudes y factores dosimétricos de interés para la obtención experimental futura.

Se ha implementado un modelo compartimental [TRITIOVI.xmcd](#) en MathCad 14.0 de tipo determinista que incluye dichas magnitudes, los *factores de conversión a dosis (DCF)* y dependencias críticas.

Por determinista se entiende, para una situación real dada (emisión/meteorología/receptor), las condiciones más desfavorables de dosis para los *Individuos Más Expuestos (MEI, Most Exposed Individuals)*.

Para ello se usa el modelo genérico desarrollado para cualquier escenario dado ([TRITIOVI.xmcd](#)) para seleccionar las condiciones más penalizantes (mayores dosis tempranas y crónicas) a los *Individuos Más Expuestos*. Éstos hacen el papel de individuos críticos a efectos de evaluación.

Para la realización de dicho modelo se estudiarán los caminos críticos a las dosis potenciales máximas considerando siempre el caso más conservador, es decir, el que produzca las mayores dosis crónicas individuales. Se comprobará finalmente que los valores obtenidos, a modo de resultado global, son inferiores a los estipulados en las guías reguladoras ICRP.



Figura 17. Centrales Nucleares en España. (Ministerio de Industria, Energía y Turismo)

Limites regulatorios para las Centrales Nucleares Españolas

Los reglamentos para las Centrales Nucleares Españolas han sido sometidos a sucesivas revisiones por el CSN con el objeto de estandarizar los límites regulatorios, Real Decreto 783/2001 (Real Decreto 783/2001, 2001). Todas las Centrales Nucleares Españolas emiten entre 1-10 Ci de tritio al año.

El Programa de Control de Efluentes fija una dosis de 100 $\mu\text{Sv/año}$, distribuida entre líquidos y efluentes gaseosos, para condiciones de operación restringida de efluentes gaseosos.



Por ley las Centrales Nucleares están obligadas a realizar cálculos específicos de las máximas dosis que podrían recibir los *Individuos Más Expuestos*, MEI, individuos críticos, con el objeto de garantizar que los valores obtenidos se encuentran por debajo de los límites reglamentarios establecidos.

Uno de los objetivos de esta medida es garantizar que, en caso de accidente, no sea necesario evacuar a la población. Bajo esta premisa se fija una dosis máxima de 50 mSv·evento⁻¹ para dosis temprana (ITER).

A continuación se indican los límites máximos de dosis establecidos (10CFR100) para las nuevas instalaciones:

- En el área de exclusión se fija una dosis de 250 mSv durante las dos primeras horas después del accidente
- En un área de baja densidad de población se fija un límite máximo de 250 mSv durante la duración completa del accidente.

De este modo el impacto radiológico se determina mediante la evaluación de las dosis recibidas por el individuo crítico en las primeras horas después del accidente (dosis tempranas) y a largo plazo (dosis crónicas).

No obstante, aunque las Centrales Nucleares emitan una gran diversidad de radioisótopos, el objetivo de este estudio se centra en el tritio y, por ello, en garantizar que las emisiones del mismo se encuentran por debajo de los límites estipulados en las guías reguladoras ICRP.

4. Desarrollo

4.1. Ciencia básica del tritio. Propiedades.

4.1.1. Introducción

El hidrógeno tiene tres isótopos naturales. El ^1H , estable, es el más común de todos, con una abundancia de más del 99,98% (Prieto Abia) y un protón en su núcleo. El deuterio, ^2H , también estable, posee un neutrón y un electrón. El tritio, ^3H , es radiactivo y posee dos neutrones y un protón en su núcleo, siendo el isótopo más pesado de los tres.



Figura 18. Formas isotópicas del hidrógeno. (Glosarios-servidor-alicante.com)

El tritio es el isótopo menos abundante (existe aproximadamente un átomo de tritio por cada 10^{18} átomos de hidrógeno (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2009)).

Tiene un período de semidesintegración de 12,3 años (European Commission, 2008), decayendo a ^3He y emitiendo una partícula β^- . Libera en esta reacción una energía media de 5,7 keV (máxima de 18,6 keV).

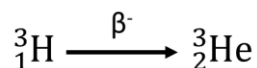


Figura 19. Desintegración beta del tritio. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2009)

4.1.2. Interacción del tritio con gases, efluentes y materiales sólidos

4.1.2.1. Gases: el tritio en el aire y en otros compuestos gaseosos

El tritio en la atmósfera se encuentra en diferentes formas, por orden de importancia: agua tritiada (HTO) en forma líquida o vapor, hidrógeno tritiado (HT) y metano tritiado (CH_3T). La dispersión del tritio sigue, en líneas generales, las leyes generales de dispersión de otras sustancias presentes en el aire. Existen, sin embargo, dos particularidades:

1. En la atmósfera hay también moléculas de agua, de hidrógeno y de metano no tritiado, que se mezclan con las moléculas tritiadas, contribuyendo a la dilución del T.
2. El agua en la atmósfera puede encontrarse en estado gaseoso, pero también en estado líquido (en las nubes y en la lluvia).

La siguiente Figura 20 muestra la evolución de las actividades de las diferentes formas gaseosas del tritio en la atmósfera a lo largo de los años:

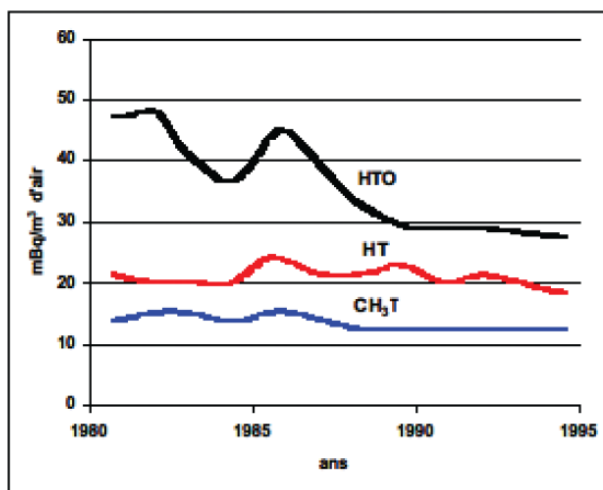


Figura 20. Evolución de las actividades de las diferentes formas gaseosas del tritio en la atmósfera a lo largo de los años. (DEI (ISRN) - Direction de l'environnement et de l'intervention, 2009)

4.1.2.2. Radioquímica del tritio en el agua

La característica fundamental del tritio cuando se encuentra formando una molécula de agua es su facilidad de intercambio con el ^1H . Las moléculas de agua suelen encontrarse en estado disociado, estableciéndose para el caso del agua tritiada los equilibrios siguientes:

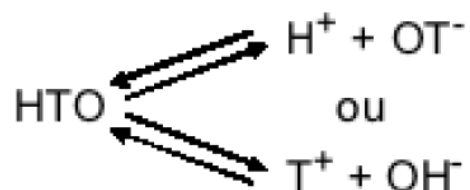


Figura 21. Equilibrios que se producen en el agua tritiada. (DEI (ISRN) - Direction de l'environnement et de l'intervention, 2009)

El estado de equilibrio depende de las reacciones ácido-base con las otras especies químicas en la solución, siendo determinante el pH del agua.

De la misma manera, el vapor de agua pesada tiene capacidad de intercambio con el agua ligera.

La concentración natural de tritio en las aguas oceánicas de superficie debía ser de media $0,1 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ (DEI (ISRN) - Direction de l'environnement et de l'intervention, 2009). Esta concentración fue ampliamente superada después de los ensayos nucleares atmosféricos.

Los aportes industriales, en particular aquellos de las instalaciones de tratamiento de combustible usado, son las principales fuentes de tritio en los ecosistemas marinos.



4.1.2.3. Interacción del tritio con materiales sólidos: hidruración, permeación y destilación

Las distintas formas en las que el tritio interacciona con los materiales sólidos son:

- **Hidruración**

El hidrógeno reacciona a elevadas temperaturas con muchos metales de transición y con sus aleaciones para formar hidruros. Los elementos electropositivos son los más reactivos, esto es, el escandio, itrio, los lantánidos, los actínidos, y los miembros de los grupos de titanio y vanadio.

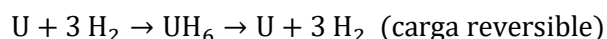
Allred-Rochow Electronegativity Ref: Huheey, J.E. Inorganic Chemistry ; Harper & Row: New York, 1983

1	2											13	14	15	16	17	18
H 2.20																	He
LiH 0.97	BeH ₂ 1.47											BH ₃ 2.01	CH ₄ 2.50	NH ₃ 3.07	H ₂ O 3.50	HF 4.10	Ne
NaH 1.01	MgH ₂ 1.23											AlH ₃ 1.47	SiH ₄ 1.74	PH ₃ 2.06	H ₂ S 2.44	HCl 2.83	Ar
KH 0.91	CaH ₂ 1.04	ScH ₂ 1.20	TiH ₂ 1.32	VH VN ₂ 1.45	CrH (CrH ₂) 1.58	Mn 1.60	Fe 1.64	Co 1.70	NiH ₂ 1.75	CuH 1.75	ZnH ₂ 1.66	(GaH ₂) 1.82	GeH ₄ 2.02	AsH ₃ 2.20	H ₂ Se 2.48	HBr 2.74	Kr
RbH 0.89	SrH ₂ 0.99	YH ₂ YH ₃ 1.11	ZrH ₂ 1.22	(NbH ₂) 1.23	Mo 1.30	Tc 1.36	Ru 1.42	Rh 1.45	PdH ₂ 1.35	Ag 1.42	(CdH ₂) 1.46	(InH ₂) 1.48	SnH ₄ 1.72	SbH ₃ 1.82	H ₂ Tc 2.01	HI 2.21	Xe
CsH 0.86	BaH ₂ 0.97	LaH ₂ LaH ₃ 1.08	HfH ₂ 1.23	TaH 1.33	W 1.40	Re 1.46	Os 1.52	Ir 1.55	Pt 1.44	(AuH ₂) 1.42	(HgH ₂) 1.44	(TlH ₂) 1.44	PbH ₄ 1.55	BiH ₃ 1.67	H ₂ Po 1.76	HAt 1.90	Rn
Fr	Ra	AcH ₃ 1.00															

CeH ₂ 1.06	PrH ₂ PrH ₃ 1.07	NdH ₂ NdH ₃ 1.07	Pm	SmH ₂ SmH ₃ 1.07	EuH ₂ 1.01	GdH ₂ GdH ₃ 1.11	TbH ₂ TbH ₃ 1.10	DyH ₂ DyH ₃ 1.10	HoH ₂ HoH ₃ 1.10	ErH ₂ ErH ₃ 1.11	TmH ₂ TmH ₃ 1.11	(YbH ₂) YbH ₃ 1.06	LuH ₂ LuH ₃ 1.14
TbH ₂ 1.11	PaH ₂ 1.14	UH ₂ 1.22	NpH ₂ NpH ₃ 1.22	PuH ₂ PuH ₃ 1.22	AmH ₂ AmH ₃ 1.2	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Figura 22. Tabla de los hidruros binarios y la electronegatividad de Allred- Rochow. (Association)

Las casillas amarillas son inertes a la interacción con el hidrógeno. Las casillas rojas se usan para almacenar H, ya que a elevadas temperaturas absorben muy bien el hidrógeno y esto permite la formación de hidruros. El material que mejor hidrura es el UH₆, considerado como el “hidruro mágico”.



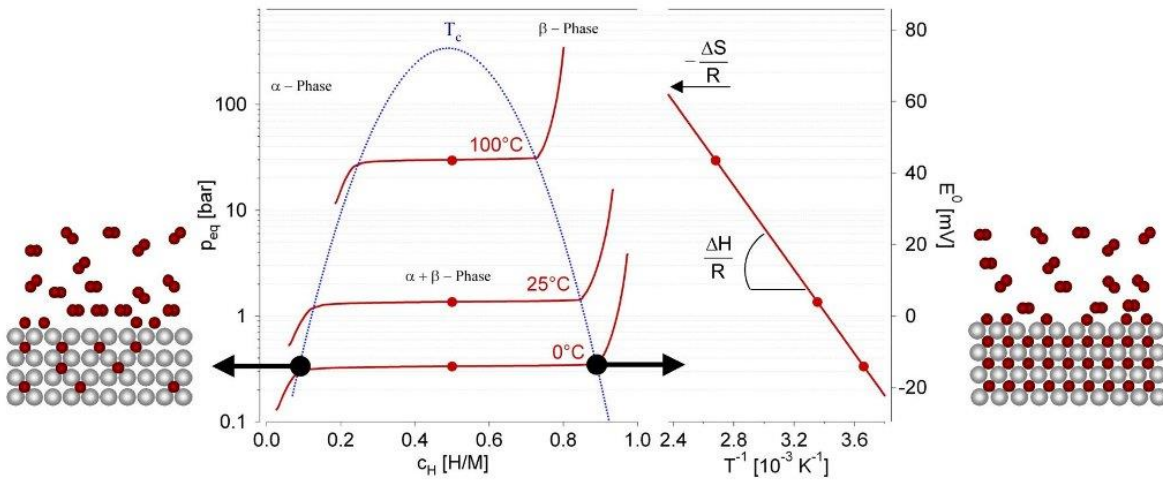
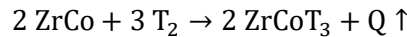


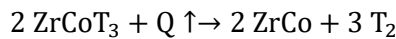
Figura 23. Diagramas de fase de la hidruación. Isothermas presión-composición para la absorción de hidrógeno en un compuesto intermetálico. La solución sólida (fase- α), la fase híbrida (fase- β) y la región de coexistencia de las dos fases. (Association)

Los hidruros muestran propiedades de gran interés, tales como la adsorción/desorción reversible y la superconductividad a alta temperatura. La manera más eficiente de almacenar tritio es en forma de hidruros de uranio. No obstante, por motivos sociales, se prefiere el uso de otros compuestos tales como el ZrCo.

Absorción:



Desorción:



El inconveniente de este compuesto es que presenta problemas de diseño, tales como el **desproporcionamiento**, que a su vez muestra efectos isotópicos que afectan a sus propiedades.



Donde X puede ser indistintamente hidrógeno, deuterio o tritio.

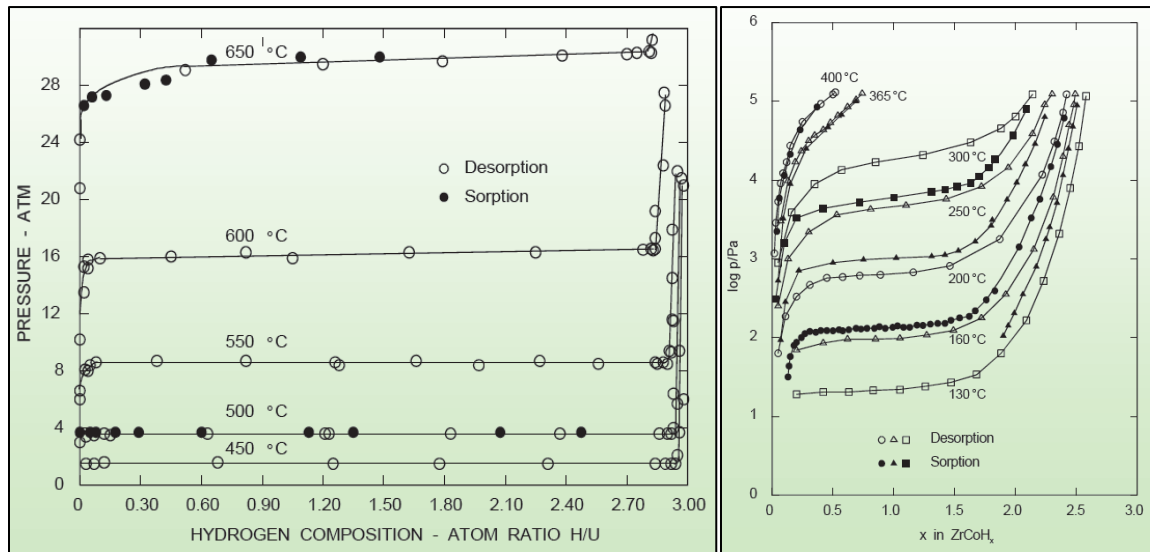


Figura 24. Diagramas de fase de la hidruración. (a) Izquierda. Diagrama de fase UH_x . (b) Derecha. Diagrama de fase $ZrCoH_x$. (Sedano)

En la Figura 24 se observa la diferencia entre ambos diagramas de fase de la hidruración. Tal como se ha comentado anteriormente, el UH_6 es considerado como el “hidruro mágico” dada su elevada reversibilidad en lo que respecta a los fenómenos de absorción/desorción. Por el contrario, la reversibilidad de estos fenómenos es mucho menor en lo que respecta al $ZrCoH_3$. Obsérvese además que el eje de ordenadas para este compuesto presenta escala logarítmica, por lo que las curvas de histéresis a escala presentarían una mayor inclinación.

Los principales beneficios del uso de los hidruros de metales para el hidrogeno comercial, así como del tritio, son el almacenamiento seguro y compacto (la forma más segura de manipularlo es en forma de hidruros) así como su separación eficiente del hidrógeno y purificación.

El uso de hidruros metálicos en las instalaciones de tritio ha llevado a una importante reducción en el tamaño de los equipos, permitiendo que el equipo sea fácilmente contenido y aislado en cajas de guantes. De esta manera, se pueden capturar todas las posibles fugas de tritio y se puede evitar su liberación al medio ambiente.

El hidrógeno y el tritio pueden ser almacenados en hidruros de metal a baja presión o a elevada temperatura. Esto proporciona una medida adicional de seguridad cuando se trata del tritio, ya que no solo es extremadamente inflamable sino que también es radiactivo.

La simplicidad es otra ventaja de la tecnología de la hidruración, lo que permite realizar diseños simples y seguros para los equipos de tritio (Motyka).

- **Permeación**

La permeación de H en un material es (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014) el flujo de gas a través de un material debido a su difusión y su disolución.

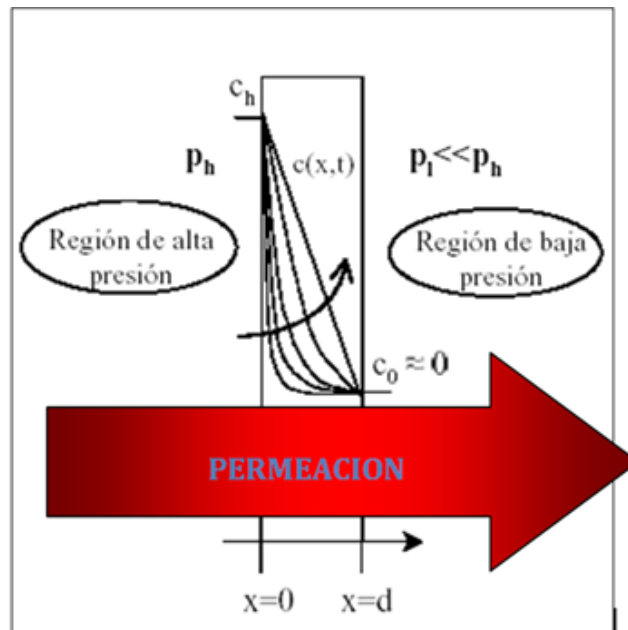


Figura 25. Esquema fenomenología de la permeación. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

La permeación es el proceso por el cual un gas atraviesa un material a nivel molecular. Este proceso sigue la llamada **ley de Sievert**.

$$C_H = K_S \cdot \sqrt{P_H} \quad (25)$$

Donde, C_H es la concentración en equilibrio disuelto en el material [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$]; P_H es la presión parcial [Pa] y K_S es la *constante de solubilidad* o de *Sievert* [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1/2}$]

$$K_S = K_{S,0} \cdot e^{\left(\frac{-E_S}{R \cdot T}\right)}$$

Siendo E_S la energía de solubilidad.

La permeación se puede representar mediante un diagrama simplificado.

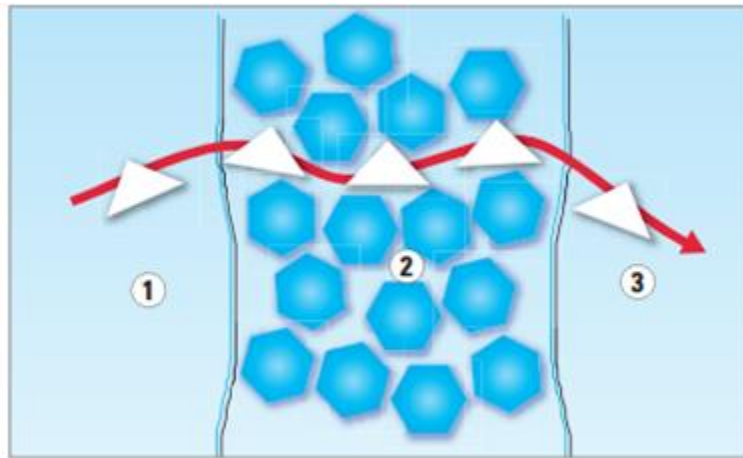


Figura 26. Proceso de permeación. (DuPont)

La permeación implica: (1) absorción de las moléculas del gas en la superficie de contacto (externa) del material y disociación de las mismas; (2) difusión de los átomos absorbidos a través del material; (3) desorción y recombinación de los átomos por la superficie opuesta (interna) del material.

Se parte de un gas libre en equilibrio a una cierta presión y temperatura. En primer lugar, las moléculas impactan con el material metálico. Estas moléculas tienen la suficiente energía como para incorporarse al metal y disociarse, ya que de este modo presentan un estado de menor energía que como moléculas libres.

Una vez que las moléculas se hayan incorporado al material y disociado, se tendrá una cierta concentración de gas en el material. Dado que en la superficie opuesta del material la concentración de gas es nula, Figura 25, existe pues un gradiente de concentración que es la fuerza motriz para la difusión. Este gradiente tiende a igualar ambas concentraciones para pasar a un estado homogéneo. La difusión es un fenómeno que se produce a nivel atómico. Como curiosidad indicar que el fenómeno de difusión es más rápido en el hidrógeno que en el tritio (debido a que la masa del tritio es tres veces mayor que la del hidrógeno).

Por último se produce el fenómeno de la recombinación. Los átomos difunden a través del material y, cuando alcanzan la superficie opuesta (interna) del material, se unen para formar una molécula, ya que ésto les permite pasar a una situación de menor energía, lo que supone mayor estabilidad.

Indicar que los metales presentan altos coeficientes de difusividad mientras que los óxidos (cerámicos) son muy poco difusivos.

Los mecanismos físicos que incluye la permeación se muestran en la Figura 27.

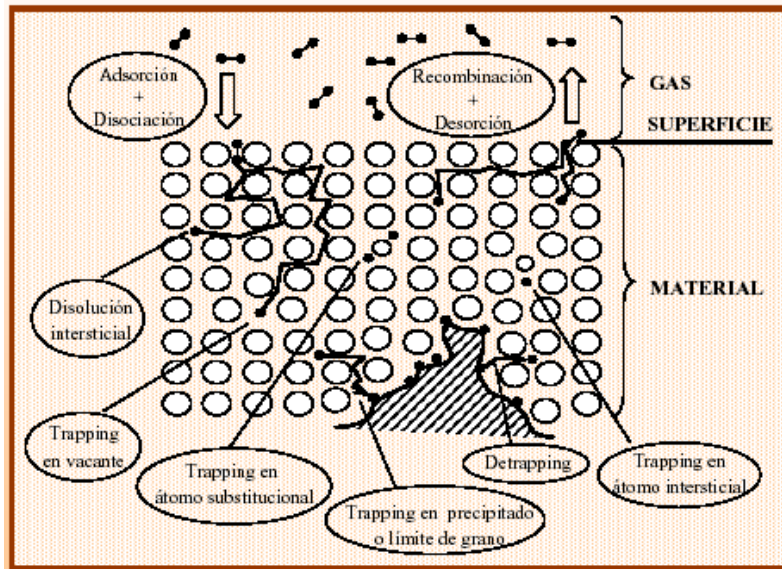


Figura 27. Mecanismos de transporte implicados en la permeación. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

A continuación, en la Figura 28, se muestra la energía de cada uno de estos procesos.

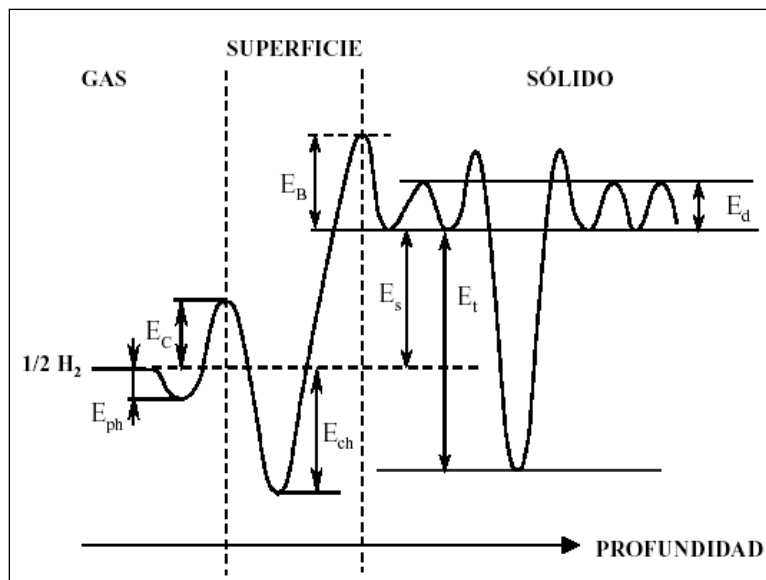


Figura 28. Diagramas de energía en la permeación. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)



E_{ph}: <u>Energía de fisorción</u> , con la que los átomos de $\frac{1}{2} H_2$ se mantienen ligados a los átomos de la superficie del material por medio de fuerzas de atracción Van der Waals.
E_C: <u>Energía de barrera de adherencia</u> , (sticking energy), depende del estado de la superficie: impurezas, rugosidad, etc.
E_{CH}: <u>Energía de quemisorción</u> , energía ligada a la coordinación y/o enlace (“binding”) de átomos en la superficie.
E_B: <u>Energía de desorción</u> , barrera energética que un átomo en disolución en la red cristalina debe superar para entrar en la superficie.
E_d: <u>Energía de difusión</u> , barrera energética con la que un átomo en solución en la red cristalina debe superar para moverse en los intersticios en la red cristalina.
E_s: <u>Energía de disolución</u> , diferencia energética entre un átomo libre del gas y uno disuelto (disolución endotérmica $E_s > 0$ o exotérmica: $E_s < 0$).
E_t: <u>Energía de trampa</u> , (trapping) energía de ligadura a un centro de “trapping”.
E_{tD}: <u>Energía adicional de “desentrampe” (“detrapping”)</u> , energía adicional que necesita el átomo para saltar de un centro de “trapping” a un sitio de difusión intersticial.

Los procesos de transporte diferencian entre procesos de superficie (aquellos que tienen lugar en la superficie de un sólido) y procesos de volumen (aquellos que tienen lugar en el interior del mismo) como subsistemas del material físicamente diferenciados, operando “en serie” e imponiendo la cinética siempre el más lento (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014).

- **Destilación**

La destilación es un proceso de separación que aprovecha las diferencias isotópicas en cuanto a los distintos puntos de ebullición (a 1 bar el rango de variación de la temperatura se encuentra entre 20 K – 25 K) de las seis combinaciones isotópicas.



H_2 [20.7 K], HD [22.1 K], HT [23.5 K], D_2 [23.8 K], DT [25.0 K], T_2 [25.5 K]

Figura 29. Principales isotómeros del hidrógeno con sus respectivos puntos de ebullición. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

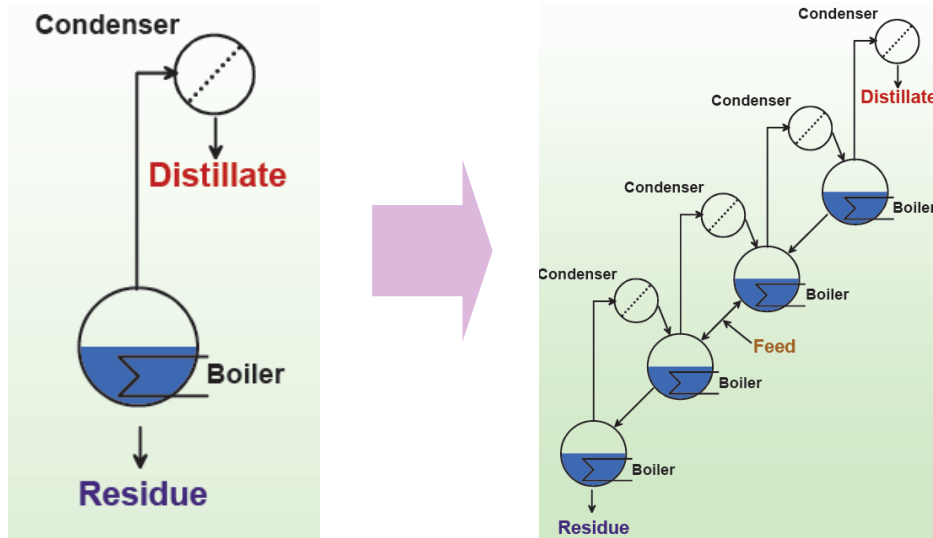


Figura 30. Proceso de destilación. (Google)

Se trata de un proceso continuo multi-etapas con alimentación en un cierto punto y extracción de residuo y destilado.



4.2. Justificación del tritio en la atmósfera

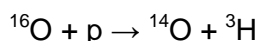
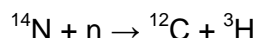
El balance global de tritio en la atmósfera, el único isótopo radiactivo del hidrógeno, es según fuentes (C.Boyer, 2009) demasiado bajo como para presentar un riesgo radiológico en una escala en todo el mundo. Cabe indicar en esta sección que la producción natural de tritio es mucho más elevada que la debida a las fuentes artificiales. Sin embargo, en un futuro próximo, es probable que aumente la liberación de tritio de fuentes puntuales con el desarrollo de las nuevas tecnologías de fusión (proyecto ITER).

Las fuentes principales de tritio en el medio ambiente son: la producción natural de tritio en la alta atmósfera, la liberación debida a los ensayos de armas nucleares y las liberaciones habituales o accidentales de la industria nuclear. En total, la carga mundial de tritio se estima en aproximadamente 1.300 PBq (3,5 kg) (UNSCEAR, 2000), que está cerca del nivel de equilibrio natural.

Las cantidades de tritio se expresan mediante su masa (gramos) o por su actividad (Bq). Un gramo de tritio corresponde a $3,58 \cdot 10^{14}$ Bq (es decir, 358 TBq o 0.358 PBq) (C.Boyer, 2009).

4.2.1. Producción natural de tritio

El tritio se produce de manera natural en la atmósfera, debido principalmente a las reacciones nucleares inducidas por los rayos cósmicos que tienen lugar en la parte alta de la atmósfera. Estas reacciones son producidas por neutrones rápidos (n) y protones (p) de alta energía liberados por los rayos cósmicos de procedencia extraterrestre que interaccionan con los átomos presentes en la atmósfera, tales como el carbono o el oxígeno.



Alrededor del 99% (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2009) del tritio producido de manera natural se oxida a agua tritiada (HTO) y se incorpora al ciclo normal del agua.

La producción anual natural de tritio en la atmósfera se encuentra entre 50 y 70 PBq, es decir, 0,15 y 0,20 kg (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010).

Una pequeña fracción del tritio natural se produce en la corteza terrestre por captura neutrónica del litio-6 (${}^6\text{Li}$) contenido en la roca, aunque esta fracción es despreciable comparada con la producida en la atmósfera.

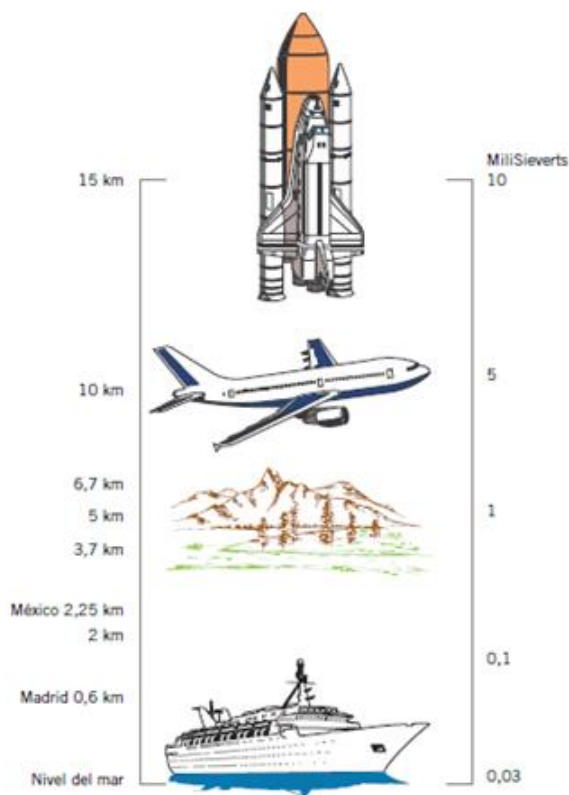


Figura 31. La radiación cósmica aumenta con la altura ya que disminuye la protección que nos proporciona la atmósfera terrestre. La figura ilustra los valores anuales de radiación cósmica a diferentes altitudes. (CSN, Dosis de radiación, 2010)

4.2.2. Producción artificial de tritio

Entre las principales causas de producción antropogénica de tritio en la atmósfera cabe destacar las siguientes.

4.2.2.1. Ensayos de armas nucleares atmosféricas

Entre las causas de producción artificial de tritio, la que mayor huella del isótopo radiactivo ha dejado por su gran trascendencia ha sido, sin lugar a dudas, la debida a las

explosiones termonucleares realizadas durante el periodo de 1952 a 1963 y, en menor medida, las realizadas en los años 70 y 80, tal como se observa en la

Figura 32.

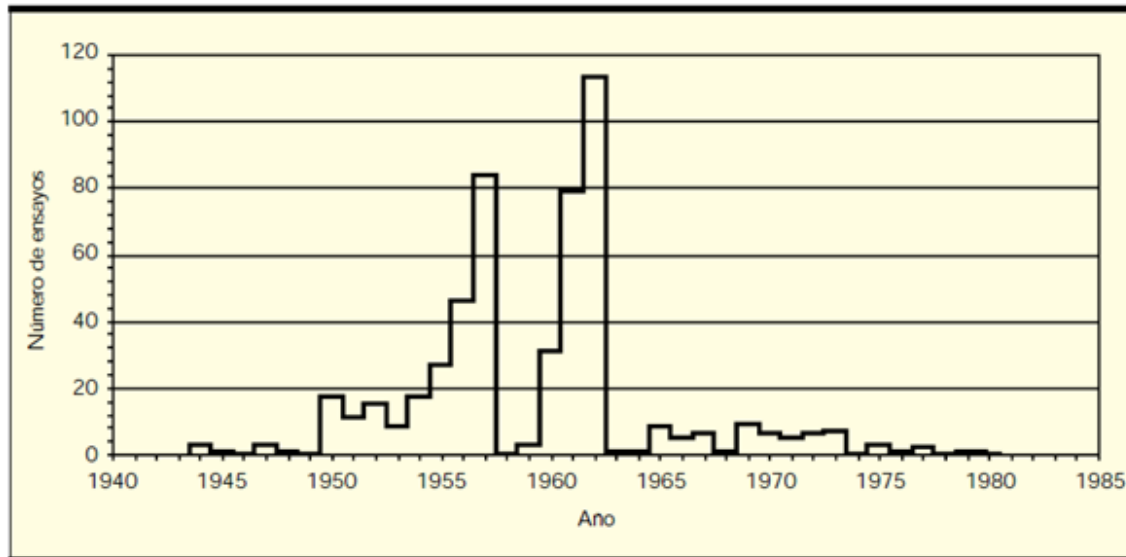


Figura 32. Número de explosiones de armas nucleares realizadas en la atmósfera entre 1944 y 1980 (Bedmar, 2006).

Antes del año 1952, el inventario global de tritio presente en la atmósfera debido a las causas naturales se estimaba en unos 3,5 kg, que equivalen a $1,275 \cdot 10^{18}$ Bq (DEI (ISRN) - Direction de l'environnement et de l'intervention, 2009). Durante el periodo comprendido entre 1945 y 1963, muchos radionucleidos, incluido el tritio, fueron liberados durante los ensayos de armas nucleares atmosféricas. Se liberaron aproximadamente 650 kg de tritio en el hemisferio norte y 130 kg en el hemisferio sur (IRSNA (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010). Debido a su corta vida radiactiva (12,35 años), el tritio que queda actualmente de las pruebas nucleares atmosféricas se estimó en 40 kg en el 2008, distribuido entre los océanos, aguas continentales y la atmósfera (C.Boyer, 2009).

Este tritio liberado como consecuencia de los ensayos de armas nucleares se distribuyó por todo el globo terrestre, siendo arrastrado por las precipitaciones en forma de agua tritiada, HTO. Dado que fue en el hemisferio norte donde se realizaron casi todos los ensayos nucleares, la mayoría de este tritio fue liberado en este hemisferio.

Por esta razón, la concentración de tritio en las precipitaciones del hemisferio norte aumentó en casi tres órdenes de magnitud, llegando hasta un valor máximo próximo a 10.000 UT¹⁵ (Bedmar, 2006) en la región central de Canadá mientras que en el hemisferio sur se incrementó en un factor de 10 (Bedmar, 2006).

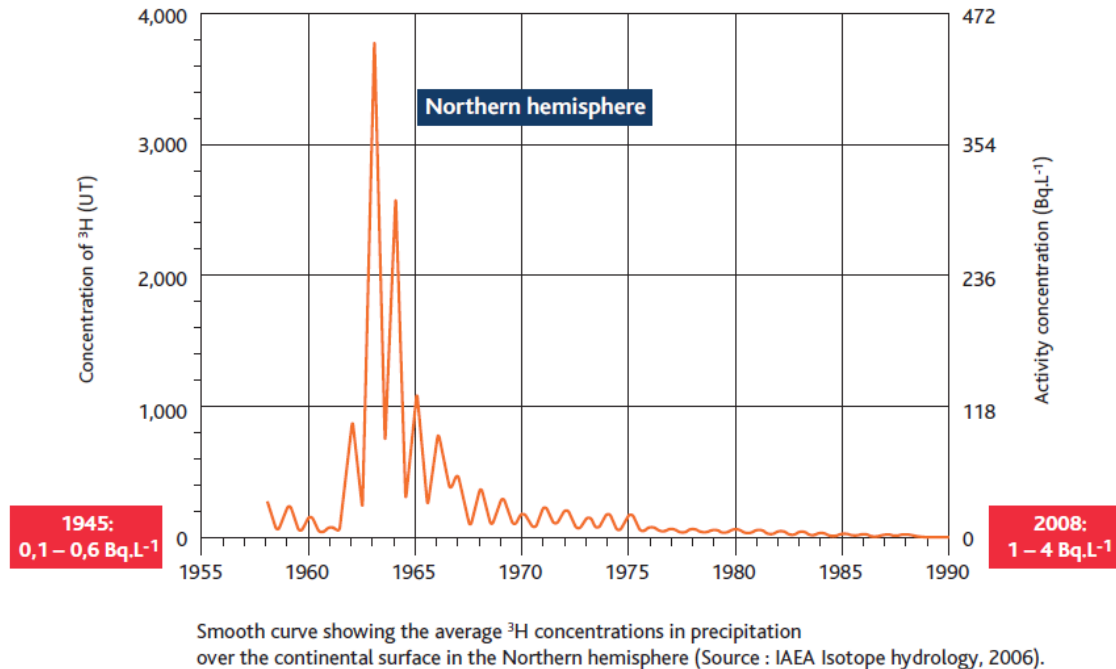


Figura 33. Cambios en las concentraciones de tritio en el agua de lluvia en el hemisferio norte entre 1945 y 2008. Los valores en rojo son los niveles de fondo en 1945 y 2008. (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010)

4.2.2.2. Plantas nucleares

Entre las principales instalaciones nucleares que liberan tritio a la atmósfera se encuentran las centrales nucleares de fisión, las plantas de reprocesamiento o reciclado de combustible nuclear y las plantas productoras de tritio.

La mayoría de las fugas importantes se producen en las plantas de reprocesamiento de combustible nuclear, donde las liberaciones son esencialmente líquidas y alcanzan varios PBq al año (por ejemplo, 10 PBq al año para la planta de reprocesamiento "La Haya", en Francia) (C.Boyer, 2009).

¹⁵ La unidad de tritio (UT) se define como una relación T/H igual a 10^{-18} con una actividad específica de $0,118 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$.



La cantidad de tritio producido en los reactores que utilizan agua pesada HWR es considerablemente mayor que en los que utilizan agua ligera PWR, en los cuales el tritio producido se queda principalmente en el combustible. En un PWR, el tritio liberado se produce por captura neutrónica del boro-10 (^{10}B).

En reactores de agua pesada HWR (por ejemplo los reactores canadienses CANDU), los rangos de los efluentes en el aire varían de 0,1 a 1 PBq y las emisiones líquidas de 0,1 a 0,5 PBq al año (C.Boyer, 2009). Las centrales nucleares térmicas que utilizan agua ligera (reactores de agua presurizada, PWR) tienen descargas bastante bajas: las liberaciones atmosféricas varían de 0,3 a 3 TBq y los vertidos líquidos son de alrededor de 20 TBq al año (C.Boyer, 2009).

Por otra parte, otras industrias son consideradas como "pequeños usuarios" de tritio que usan este isótopo radiactivo para fines médicos, de investigación y desarrollo o para instalaciones de alumbrado con tritio. Estos dispositivos producen pocas emisiones de tritio (algunos PBq por año) (C.Boyer, 2009).

Las emisiones industriales totales (HT y HTO) son actualmente de alrededor de $0,06 \text{ kg}\cdot\text{año}^{-1}$ (C.Boyer, 2009), mientras que la producción natural de agua tritiada varía de $0,15 - 0,20 \text{ kg}\cdot\text{año}^{-1}$ (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010).

4.2.2.3. Otras formas de producción artificial

El tritio también aparece en los residuos nucleares enterrados en el mar entre 1949 y 1982 en la parte noreste del Océano Atlántico. El inventario está en el intervalo de $4\cdot 10^{16}$ Bq de tritio (aproximadamente 112 g) (IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), 2010). Además se produce en ciertas industrias como la militar, médica o en la fabricación de relojes y pinturas luminosas.

4.2.2.4. Usos futuros del tritio

En el futuro, se espera que las recientes aplicaciones conduzcan a nuevas fuentes de producción de tritio artificial. Estas nuevas aplicaciones de uso futuro del tritio se refieren principalmente a instalaciones de fusión nuclear, tales como el Reactor Termonuclear Experimental Internacional, ITER). La cantidad de tritio utilizado por el ITER se elevaría a $1,5 \text{ kg}\cdot\text{año}^{-1}$ (C.Boyer, 2009); por lo tanto, la liberación producida asociada a la atmósfera podría ser significativa.



En una escala menor, los láseres de alta potencia, tales como el láser Mega Joule de la agencia atómica francesa, CEA, podrían utilizar unos pocos miligramos de tritio al año (C.Boyer, 2009).



5. Programa TRITIOVI.xmcd

5.1. Descripción del modelo

El conjunto de conocimiento generado, comprensión de mecanismos y bases de datos revisada cristaliza en este trabajo en la elaboración de la rutina de cálculo [TRITIOVI.xmcd](#) a modo de hoja de cálculo interactiva en MathCad 14.0.

El detalle explicativo del modelo y diversos submodelos se adjunta en más de 50 líneas de comentarios a más de 500 líneas de programa.

La programación del modelo es lineal transformando las plumas de dispersión de concentraciones tritiadas HT, HTO en mapas de iso-dosis para *Dosis Crónicas* en *Operación Normal* y Dosis Accidentales: tempranas y crónicas (CEDE).

En el *Anexo V* se aportan líneas de [Programa TRITIOVI.xmcd](#) desarrollado en este Trabajo Fin de Master como desarrollo inicial de una utilidad numérica a desarrollar a futuro.

5.2. Algunos casos paramétricos de interés

[TRITIOVI.xmcd](#) está desarrollado como herramienta genérica; su uso concreto demanda entradas concretas dadas referidas a datos de emplazamiento, tipo de emisión, evolución meteorología, orografía del terreno, datos socioeconómicos, etc.; es decir, una particularización a un caso concreto.

Para el caso de España dicha concreción resulta de interés para el caso de emplazamientos de CC.NN.

Sin duda, uno de los emplazamientos con caracterización completa como emplazamiento nuclear es, entre otros, el emplazamiento donde se ubicaba en su día Vandellòs I, II, hoy para Vandellòs II.

Se usan datos meteorológicos correspondientes a 2 décadas 1995-2005, 2005-2010 para histórica de vientos y clasificaciones de estabilidad, y humedades absolutas y relativas. Con esta información se computan valores de $C(x,y,z)/Q$ y coeficientes de deposición (DD/Q) como entradas para el modelo en radios de 0 - 30 km.



Los valores mayorantes de $[C(x,y,z)/Q]$ en proximidad a fuente (zonas de exclusión perimetral < 750 metros) se sitúan en valores máximos de $8 \cdot 10^{-6} \text{ s/m}^3$. Los valores mayorantes de $[C(x,y,z)/Q]$ en zonas alejadas a la fuente (zona perimetral 30 km) se sitúan en valores máximos de 10^{-9} s/m^3 .

Los valores mayorantes de $[DD(x,y,z)/Q]$ en proximidad a fuente (zonas de exclusión perimetral < 750 metros) se sitúan en valores máximos de $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^{-2}$. Los valores mayorantes de $[DD(x,y,z)/Q]$ en zonas alejadas a la fuente (zona perimetral 30 km) se sitúan en valores máximos de 10^{-12} m^{-2} .

Los valores de H (Humedad Absoluta) en la meteorología de la zona se sitúan entre mínimos de $4,9 \pm 1,0 \text{ (g/m}^3\text{)}$ en los meses de invierno a valores de $16,0 \pm 1,8 \text{ (g/m}^3\text{)}$ en verano. La elección de valores de H en verano maximiza el cálculo final de dosis y puede elegirse de manera conservadora en los cálculos de dosis en Operación Normal y Accidental.

La elección de un amplio número de parámetros de entrada en el modelo dosimétrico (comentarios ver *Anexo V*) se lleva a término en base a las indicaciones de diversas Regulaciones Internacionales, en su mayoría US/NRC:

- US NRC 1.111
- US NRC RG 1.23
- US NRC 1.109
- ICRP-30, -71
- US NRC 1.145

5.3. Resultados parciales

Un modelo determinista sencillo como el implementado en el [Programa TRITIOVI.xmcd](#) y con valores muy mayorantemente penalizantes en las dosis evaluadas reporta resultados muy por debajo de los límites establecidos para operación normal ($\text{mSv} \cdot \text{año}^{-1}$) o casos accidentales ($\text{Sv} \cdot \text{evento}^{-1}$), lo que justifica un interés de desarrollo del [Programa TRITIOVI.xmcd](#).

6. Diseño y especificaciones básicas del huerto-invernadero experimental

6.1. Configuración del huerto-invernadero

El presente huerto-invernadero, de carácter experimental, pretende hacer una representación aproximada de un laboratorio natural que represente distintos ecosistemas.



Figura 34. Huerto-invernadero. Vista exterior.

Sobre una base circular de 100 m de radio y 50 m de altura, se sitúa en el centro de la misma una fuente (chimenea) de 30 m de altura, con orificios a distintos niveles, incluido a nivel del suelo, para representar los distintos tipos de fuentes (fuente plana, distribuida, chimenea, etc) y emisiones (HT, HTO).

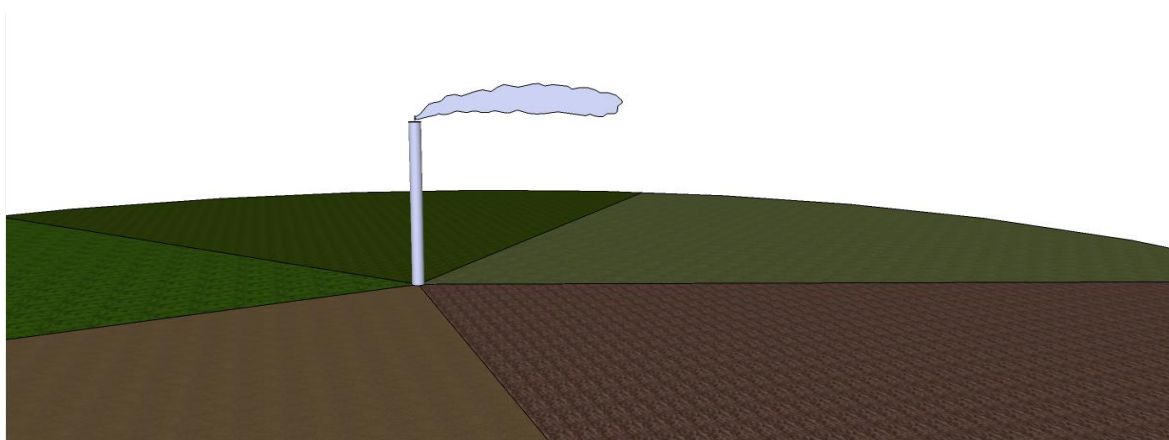


Figura 35. Huerto invernadero. Detalle chimenea.

La base de la circunferencia se divide en cinco sectores bioclimáticos de 72°, representando cada uno de ellos un tipo de clima en España: (1) clima oceánico; (2) clima continental; (3) clima mediterráneo; (4) clima de montaña y (5) clima subtropical. Cada sector está dividido en dos mitades, considerando en todos los climas suelo cultivable como hipótesis más conservadora.

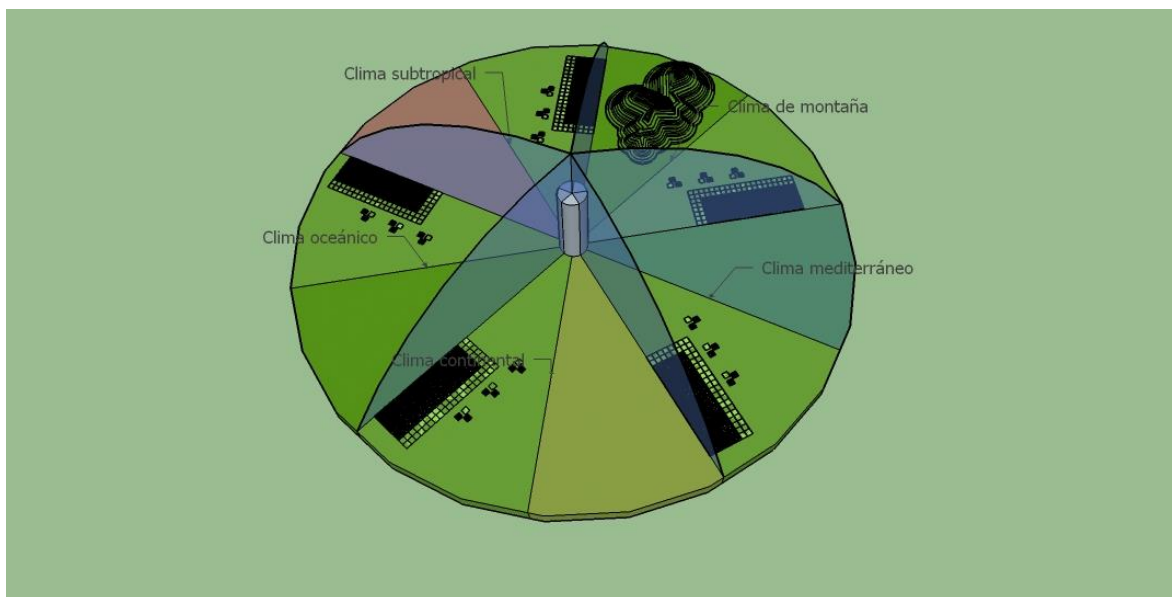


Figura 36. Huerto-invernadero. Sectores bioclimáticos.

El **clima oceánico**, presente en Galicia y la cornisa Cantábrica, se caracteriza por abundantes precipitaciones, siendo la vegetación más característica los bosques de hayas, robles y castaños. El **clima de montaña** es propio de sistemas montañosos tales como los Pirineos, el Sistema Central y la Cordillera Penibética. Predominan las precipitaciones en forma de nieve, que aumentan con la altitud, y la vegetación (pino, roble) es escasa. El **clima continental** es un clima de interior, típico de la meseta, que se caracteriza por temperaturas extremas y escasas precipitaciones. El **clima mediterráneo**, de escasas e irregulares precipitaciones, presenta temperaturas elevadas en verano y suaves en invierno, destacando los árboles de hoja perenne como las encinas y el alcornoque. Por último, el **clima subtropical** (islas Canarias) presenta temperaturas suaves todo el año, con escasas precipitaciones. Las especies típicas en cuanto a vegetación son: el pino canario, la palma canaria y el drogo.



Figura 37. Climas de España. (El clima, la vegetación y la fauna de España)

Cabe hacer una distinción también entre los distintos niveles: suelo, subsuelo y atmósfera.

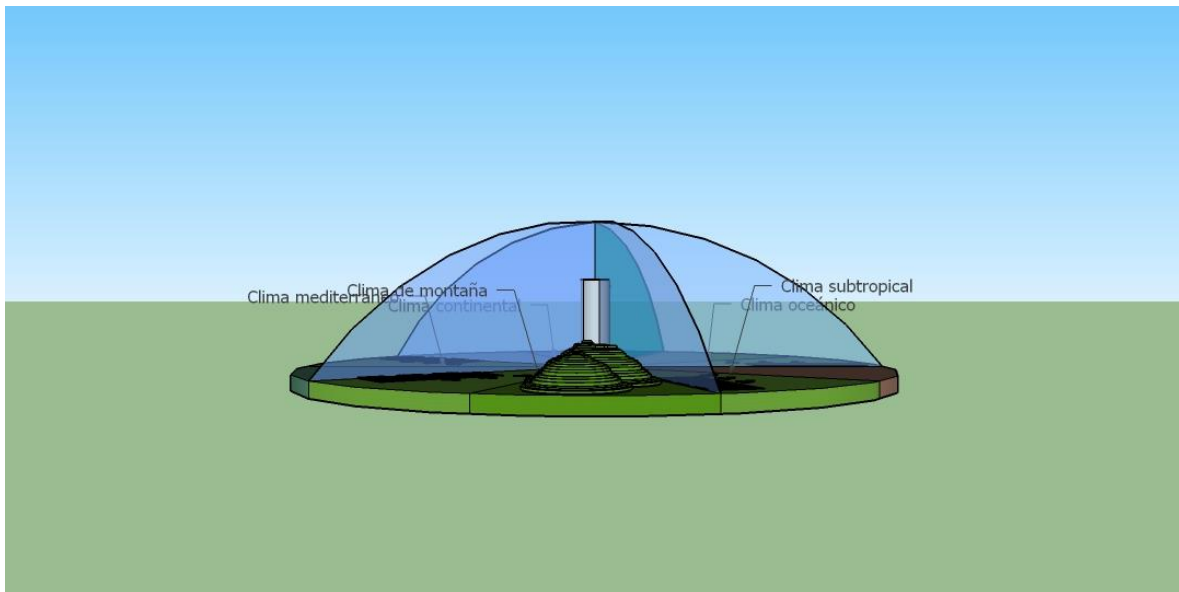


Figura 38. Huerto invernadero. Detalle del suelo, subsuelo y atmósfera.



En la atmósfera juegan un papel fundamental las condiciones atmosféricas (*clases de estabilidad*), que se simularán mediante un gestor de clases atmosféricas. En lo que respecta al terreno, se reproducirán los distintos tipos de vegetación en función del sector bioclimático correspondiente¹⁶.

¹⁶ El *Anexo IV: Detalles huerto-invernadero* incorpora distintas vistas y detalles del huerto-invernadero experimental.



6.2. Equipamientos

El huerto-invernadero cuenta con un sofisticado equipamiento, lo que permitirá simular a la perfección tanto las condiciones atmosféricas como los tipos de terreno, vegetación y condiciones socioeconómicas.

Por ello cuenta con una fuente puntual (chimenea) situada en el centro del círculo, desde la que se emite el contaminante en cuestión (HT, HTO), un gestor de *clases de estabilidad atmosféricas* (con un equipamiento de ventiladores, sistemas de control de humedad, etc. que permitirán simular el grado de turbulencia atmosférica, la velocidad del viento y la nubosidad), un gestor de radiación (lámparas) para simular la radiación solar y un sistema de irrigación, lo que permitirá reproducir las precipitaciones. A partir de ellos se reproducirán las distintas condiciones atmosféricas basándose, principalmente, en las *clases de estabilidad*.

Para representar cada sector bioclimático, el tipo de suelo se incorporará artificialmente y respecto a la vegetación, se plantará la típica de la zona.

Finalmente, se emplearán técnicas analíticas (contadores de centelleo) para realizar medidas de tritio en el agua, tritio en sustancias orgánicas y en tejidos vivos.



6.3. Análisis dimensional: especificaciones

En este apartado se justifican los valores y parámetros del huerto-invernadero experimental mediante un análisis dimensional.

Se realiza de manera muy preliminar, con un diseño muy fino, mediante la herramienta de cálculo MathCad 14.0 y el software [TRITIOVI.xmcd](#).



6.4. Planes experimentales prospectivos para el huerto-invernadero

Se lista por anticipado el conjunto de ensayos experimentales a realizar. Éstos, en general, intentan cuantificar parámetros de transferencia K_D para todos y cada uno de los *caminos de transferencia a dosis* previamente descritos:

Objetivo experimental 1.

Un gestor de *clases de estabilidad atmosféricas* por simulación de condiciones atmosféricas para la dispersión (velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, tiempos de radiación, etc) para cuantificación de coeficientes de dispersión.

Objetivo experimental 2.

Medidas de parámetros de deposición (seca y húmeda) de especies tritiadas en función de las *clases de estabilidad*.

Objetivo experimental 3.

Ensayos de migración, retención y medidas en suelos en función de las características de éstos: constantes de deposición, constantes de evapotranspiración, medidas de conductividad hidráulica, estudios físico-químicos en el suelo, columnas de Wind, etc.

Objetivo experimental 4.

Parámetros del modelo acoplado suelo-raíz-vegetal-atmósfera (constantes de evapotranspiración en vegetales, estudios microbiológicos en suelos, estudios de biorremediación, etc).

Objetivo experimental 5.

Estudios de transferencia a alimentos y animales vivos, en particular, algunos que engloban la dieta humana.

En principio debería concebirse este huerto-invernadero como una instalación experimental radiactiva con el uso de cantidades reguladas de tritio (hasta 10 Ci = 1 mg) en sus formas, lo que introduciría alguna complejidad regulatoria para su aprobación como instalación radiactiva por parte del CSN.



Aun así, una importante parte de la actividad experimental prevista podría realizarse con deuterio en sus formas, DH, DHO, bien entendidas, como se ha hecho en este trabajo, las dependencias isotópicas de algunos procesos de transferencia y constantes.

El uso de deuterio introduce dificultades respecto del conjunto de técnicas analíticas asociadas a la experimentación del huerto-invernadero para el tritio. En principio la experimentación directa con tritio con técnicas analíticas nucleares al uso, medidas por centelleo (medidas de actividad beta por centelleo) permite bajar a umbrales de detección y medida por debajo de $1 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$. El conjunto de medidas analíticas a considerar pueden resumirse en:

Tipo de medida analítica 1.

Medidas de tritio en agua de libre de circulación, condensación, etc (contadores de centelleo, LSC).

Tipo de medida analítica 2.

Medidas de tritio en materia orgánica, previa calcinación y muestreo del agua resultante de la calcinación (TFWT): LSC.

Tipo de medida analítica 3.

Medidas de tritio OBT en tejidos vivos vegetales y animales por técnicas de tratamiento químico y medidas en dilución. En este sentido, desde el punto de vista de las técnicas analíticas, disponer de un equipo de conteo por centelleo resulta de mayor interés en la necesidad experimental, siendo la clave de los equipos experimentales a considerar.

La experimentación isotópica sustituida con deuterio conduciría al uso de técnicas espectroscópicas avanzadas, Espectroscopía de Masas de Fotoionización, técnica analítica que resulta isotópicamente selectiva.



7. Conclusiones

En este Trabajo Fin de Máster “Diseño de un huerto-invernadero para medidas experimentales de dispersión atmosférica, deposición, re-emisión y transporte en suelos de isótopos hidrogenoides para análisis de impacto ambiental asociados al tritio” se ha revisado de manera exhaustiva todo un conjunto de aspectos que inciden en lo que se denomina “Ciencia básica del tritio” en lo que afecta a aspectos que inciden en su impacto ambiental en el medio natural.

Por ser fuente primaria de emisión generada en la mayor parte de dispositivos nucleares (todas las centrales nucleares españolas emiten entre 1-10 Ci/año en operación normal) y ante la llegada inminente (2021) de nuevas instalaciones nucleares que manejan enormes inventarios (10 kg) de tritio (caso de ITER y otros), es hoy por hoy uno de los isótopos radiactivos que atraen mayor atención y escrutinio público.

La reciente regulación europea (Directiva 2013/51/Euratom, 2013) de inminente transposición al derecho ambiental Español (antes de 2018) impone un estricto control radiológico en aguas de consumo.

Con la llegada de nuevas instalaciones que gestionan importantes inventarios de tritio en planta (ITER), se han venido generando discusiones del más alto nivel entre sociedades científicas (Física de la Salud frente a Comunidad Nuclear) sobre la revisión e idoneidad de los límites dosimétricos (ICRP 60, 1 mSv dosis CEDE) de impacto ambiental respecto a la emisión de formas tritadas desde las instalaciones.

Una reducción de un orden de magnitud en el límite dosimétrico ICRP, es decir, desde 1 mSv dosis CEDE a 0,1 mSv, podría comportar exigencias de diseño prohibitivas (por ejemplo, caso de tritio en ITER, la implementación de principios de diseño ALARA exigiría un número superior de barreras de interposición sistema a sistema y costes prohibitivos, multiplicando por 10 el coste de la instalación).

En este contexto, se justifica el interés de evaluaciones sofisticadas de impacto ambiental desde el punto de vista tanto fenomenológico y de análisis de los distintos caminos de transferencia a dosis; como desde el punto de vista de la robustez numérica de dichas evaluaciones.



En este trabajo se ha desarrollado un modelo sencillo de análisis dosimétrico ambiental de instalaciones que emiten formas tritadas (HT, HTO). Inicialmente se ha revisado el conjunto de procesos en planta (operaciones unitarias) desde los que opera el control (o no control) de tritio en las instalaciones. Esta revisión ha servido para justificar valores de referencia actuales en lo que son las directrices de emisión en condiciones operativas establecidas (operación normal, incidental o accidental) que permiten establecer o manejar valores de referencia para términos fuente de emisión en instalaciones de gran inventario (ITER).

Posteriormente, se ha generado y revisado un modelo dosimétrico-ambiental de tipo compartimental estructurado en diferentes submodelos: (1) submodelo fuente y emisión; (2) submodelo de dispersión atmosférica; (3) submodelo de química atmosférica y deposición; (4) submodelo de transferencia atmósfera-superficie; (5) submodelo edafológico; (6) submodelo de transferencia a dosis al ser humano (OBT); entrando en la descripción físico-química del conjunto de caminos de transferencia a dosis y cuantificando los mecanismos de transporte en términos de coeficientes de dispersión, de transferencia, de absorción, de re-emisión, etc.

Todo ello se ha implementado en una herramienta de cálculo [TRITIOVI.xmcd](#) en MathCad 14.0 (*Anexo V: Programa TRITIOVI.xmcd*).

El interés de desarrollo e implementación del modelo dosimétrico y de impacto ambiental en esta herramienta numérica es doble.

Un cálculo sencillo (determinista, penacho gaussiano), fenomenológicamente sofisticado y muy conservativo, confirma valores dosimétricos de impacto ambiental muy por debajo de los límites establecidos en las regulaciones actuales.

Desde las posibilidades de cálculos paramétricos (tasas de transferencia) que ofrece [TRITIOVI.xmcd](#) para la evaluación de dosis, se han podido justificar los parámetros críticos de diseño de una instalación experimental “Huerto invernadero” (sección *Diseño y especificaciones básicas del huerto-invernadero experimental*) que reproduce de manera adimensional las características atmosféricas (*clases de estabilidad*) para la experimentación del modelo atmosférico compartimental y de los submodelos considerados.



7.1. Próximos desarrollos

Este Trabajo Fin de Máster asienta los fundamentos sólidos para un posible trabajo de investigación futuro.

El modelo numérico desarrollado [TRITIOVI.xmcd](#) es un modelo numérico sencillo de tipo determinista y gaussiano.

La extensión de los modelos a modelos probabilistas, es decir, en los que se consideran secuencias meteorológicas temporales (evolución temporal de las clases de estabilidad en todo el retículo espacial de modelización) es el paso siguiente en el refinamiento de este tipo de desarrollos.

La extensión del modelo de penacho gaussiano a la dispersión euleriano-lagrangiana, en la que cada concentración dispersada es entendible temporalmente en términos de nueva fuente local en las condiciones atmosféricas (*clases de estabilidad*) cambiantes, resulta un refinamiento de gran interés numérico en el modelo.

La consideración de datos meteorológicos reales, bien sobre la base de datos existentes, datos regionales existentes o bien sobre la base de datos predictivos (AEMET), representa una sofisticación natural de este tipo de cálculos. Lo mismo ocurre con los datos orográficos reales, con la posibilidad de manejar datos SIG (Sistema de Información Geográfico) en los que insertar, a modo de capa de datos, un modelo socioeconómico y demográfico regional. Todo ello, para unas coordenadas dadas de posicionamiento (GPS) de emisión de la fuente.

Estos desarrollos conducirían a lo que se denomina una **plataforma computacional y compartimental integrada** para evaluaciones dosimétricas ambientales como producto de desarrollo futuro de gran interés en múltiples ámbitos (redes de vigilancia radiactiva, radiológica, etc.)



8. Bibliografía

10CFR100. (s.f.). Reactor Site Criteria.

A. M. Requejo, R. M. (s.f.). *Study of the Diets and Eating Habits of the Spanish Population*. CSN/CIEMAT.

Association, T. S. (s.f.). *Hydrogen. Everything about hydrogen*. Obtenido de <https://hydropole.ch/en/hydrogen/storage/#!/prettyPhoto>

B. F. Peterman, J. R. (1985). HT/HTO conversion in mammals. *Fusion Technology*.

Baver, L. D. (1956). *Soil Physics*. New York: John Wiley & Sons.

Bedmar, A. P. (2006). Presente y futuro del tritio natural como herramienta de investigación hidrológica. *Ingeniería Civil 143/2006*, 1-3.

Begemann, F. (1963). *Earth Science and Meteorites*. Amsterdam: North Holland Publishing Co.

Briggs, G. A. (1972). *Dispersion of Chimney Plumes in Neutral and Stable Surroundings*. Atmospheric Environment.

Brown, R. M. (1979). Environmental Tritium in Trees. Behaviour of Tritium in the Environment. IAEA.

Burger, L. (1976). *The Conversion of Tritiated Hydrogen to Water in the Atmosphere*. Battelle.

Butí, P. C. (1990). *Fundamentos de dosimetría teórica y protección radiológica*. Universidad Politécnica de Cataluña.

C.Boyer, L. M.-F. (2009). Tritium in plants: A review of current knowledge. *Environmental and Experimental Botany*, 1-18.

CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial). (2014). *In Tritium Process*.

CNSC. (2009). *Investigation of the Environmental Fate of Tritium in the Atmosphere*. Canadá: Canadian Nuclear Safety Commission.



- Crawford-Brown, D. J. (1984). An Age-depended Model of Tritium Metabolism Following Mixed (organic/inorganic) intakes. *Health Physics*.
- CSN. (2009). *Magnitudes y unidades radiológicas*.
- CSN. (2010). *Dosis de radiación*. CSN.
- D. G. Potter, G. V. (1972). Metabolism of Tritiated Water in the Dairy Cow. *Health Physics*.
- D. Galeriu, P. D. (2007). *Tritium Radioecology and Dosimetry – Today and Tomorrow*. Rochester, New York: 8th International Conference on Tritium Science and Technology.
- DEI (ISRN) - Direction de l'environnement et de l'intervention. (2009). *Le tritium dans l'environnement*.
- Directiva 2013/51/Euratom. (2013). *Directiva 2013/51/Euratom del Consejo, de 22 de octubre de 2013, por la que se establecen requisitos para la protección sanitaria de la población con respecto a sustancias radiactivas en las aguas destinadas al consumo humano*. BOE.
- DuPont. (s.f.). *Guía de Permeación DuPont*. Obtenido de http://www.dupont.com/content/dam/dupont/tools-tactics/dpt/safespec-chem-eu/documents/LIT_ES_Permeation.pdf
- El clima, la vegetación y la fauna de España*. (s.f.). Obtenido de <http://www.aitanatp.com/nivel6/clima/climas.htm>
- European Commission. (2008). *Emerging Issues on Tritium and Low Energy Beta Emitters*.
- F. Reiter, K. F. (1993). *A Compilation of Tritium-Material Interaction Parameters in Fusion Reactor Materials*. Luxembourg: Commission of the European Communities.
- F. S. Spencer, T. G. (1986). *Molecular Tritium Conversion in Vegetation, Litter and Soil*. Radiation Protection Dosimetry.
- Glosarios-servidor-alicante.com. (s.f.). *Glosario de Astronomía*. Recuperado el 23 de Abril de 2016, de <http://glosarios.servidor-alicante.com/astronomia/isotopo>



- Google. (s.f.). Obtenido de <https://www.google.es/>
- IAEA. (s.f.). *International Atomic Energy Agency*. Obtenido de <https://www.iaea.org/>
- ICRP-103. (2007). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. APCNEAN.
- ICRP-30. (1980). *Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*. Pergamon Press.
- ICRP-60. (1991). *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Pergamon Press.
- ICRP-67. (1989). *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1*. Pergamon Press.
- ICRP-71. (1995). *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients*. Pergamon Press.
- ICRP-72. (1995). *Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients*. Pergamon Press.
- IPSN - Département de Protection de la santé de l'Homme et de Dosimétrie. (s.f.). *Tritium - Fiche Radionucléide*.
- IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire). (2009). *Tritium*.
- IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire). (2010). *Tritium and the environment*.
- ITER. (s.f.). *Plant Design Specification (PDS)*.
- J. van den Hoek, R. K. (1979). Transfer and Incorporation of Tritium in Mammals. *IAEA*.
- Jacobs, D. (1968). *Sources of tritium and its behavior upon release to the environment*. AEC Critical Review Series.
- L. F. Martínez, M. M. (2002). *Analysis of Effluents and Releases with Regard to Spanish Legislation (Calculation of Radiation Dose to the Public under Normal and Accident Conditions)*. Madrid: Empresarios Agrupados.



- L. R Anspaugh, J. J. (1975). The Dose to Man Via Food-Chain Transfer Resulting from Exposure to Tritiated Water Vapour.
- Magnitudes dosimétricas.* (s.f.). Obtenido de Departamento de Electrónica Automática y Bioingeniería: <http://dea.unsj.edu.ar/mednuclear/CAP2.PDF>
- Martin, D. O. (1976). *The change of concentration standard deviation with distance.* Journal of the Air Pollution Control Association.
- Masters Gilbert M., E. W. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental.* Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Mayol, M. V. (2004). *Desarrollo de una Metodología Integral para la Evaluación del Impacto Medioambiental de la Emisión Gaseosa de Tritio en Reactores de Fusión.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (s.f.). Obtenido de <http://www.minetur.gob.es/es-ES/Paginas/index.aspx>
- Motyka, T. (s.f.). Hydrides for Processing and Storing Tritium.
- NNDC. (s.f.). *Chart of Nuclides.* Obtenido de <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>
- Osborne, R. V. (1966). Absorption of Tritiated Water Vapour by People. *Health Physics* 12.
- Peterson, W. B. (1978). *User's Guide for PAL - A Gaussian Plume Algorithm for Point, Area, and Line Resources.* U.S Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- Prieto Abia, S. (s.f.). *Isótopos del Hidrógeno.* Obtenido de http://platea.pntic.mec.es/dgarcia/c0708/0708_octavillas/tif2u19_isotopo.pdf
- R. Hill, J. J. (1993). Metabolism and Dosimetry of Tritium. *Health Physics.*
- R. Kirchmann, G. G. (1986). *Accidental Release of Elemental Tritium Gas and Tritium Oxide: Models and IN SITU Experiments on Various Plants Species.* Radiation Protection Dosimetry.
- R. M Brown, G. L. (1987). Field Studies of HT Oxidation and Dispersion in the Environment I. The 1986 August Experiment at Chalk River. *Health Physics.*



- R. M. Brown, G. L. (1988). Field Studies of HT Oxidation and Dispersion in the Environment. The 1987 June Experiment at Chalk River. *Fusion Technology*.
- Raskob, W. (1991). *UFOTRI: Program for assessing the off-site consequences from accidental tritium releases*. Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- Real Decreto 783/2001. (2001). *Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes*. BOE.
- Sedano, L. (s.f.). *Management, Safety and Environment issues open to R&D youngs' entrepreneurship*.
- Sydney Chapman, T. G. (1970). *The Mathematical Theory of Non-uniform Gases*. Cambridge Mathematical Library.
- Turner, D. B. (1969). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. Washington: U.S Environmental Agency.
- UNSCEAR. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR.
- WebElements Periodic Table of the Elements*. (s.f.). Obtenido de <https://www.webelements.com/>
- Y. Belot, D. G. (1979). Prediction of the Flux of Tritiated Water from Air to Plants Leaves. *Health Physics*.



ANEXOS



Anexo I. Clases de estabilidad atmosférica

Las clases de estabilidad juegan un papel fundamental en los submodelos de dispersión atmosférica. El concepto de estabilidad atmosférica está ligado al de *clase de estabilidad* y, por lo tanto, al de turbulencia atmosférica. El método de Pasquill-Gifford diferencia entre seis clases o patrones estándares de estabilidad que van desde la A (extremadamente inestable) hasta la F (moderadamente estable). Estas clases y su denominación correspondiente se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Clases de estabilidad atmosférica. (Masters Gilbert M., 2008)

Clase de estabilidad	Denominación	Gradiente
A	Extremadamente inestable	< -1,9
B	Moderadamente inestable	-1,9 a -1,7
C	Ligeramente inestable	-1,7 a -1,5
D	Neutra	-1,5 a -0,5
E	Ligeramente estable	-0,5 a 1,5
F	Moderadamente estable	> 1,5

Este método permite asociar una *clase de estabilidad* en función de las condiciones atmosféricas, Tabla 11, siendo los factores determinantes:

- Velocidad del viento a 10 m de altura
- Nubosidad
- Radiación solar

Tabla 11. Clasificación de las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill. (Turner, 1969)

Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura	Día			Noche	
	Radiación solar entrante			Cubierta de nubes	
	Fuerte	Moderada	Débil	En su mayoría nublado	En su mayoría despejado
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D



Anexo II. Inputs. Propuesta de bases de datos

La finalidad de este Anexo es la propuesta y construcción de una base de datos física, termofísica y termoquímica del hidrógeno y de sus formas isotópicas.

II.1. El tritio como radioisótopo

El tritio, el único isótopo radiactivo de hidrógeno (número atómico: 1; peso atómico: 3), presenta unas propiedades físicas y químicas muy próximas a las de hidrógeno. No obstante, las seis formas isotopoméricas hidrogenoides [H₂, HD, HT, D₂, DT, T₂] presentan propiedades diferentes, tanto físicas como termoquímicas, que deben ser consideradas cuantitativamente a la hora de diseñar componentes y sistemas y en la simulación de procesos

La documentación existente relativa a valores experimentales para las formas radiactivas (HT, DT, T₂) resulta limitada, por lo que el acceso a estos datos es problemático.

II.2. Magnitudes

M: masa atómica [uma]

P: Presión [bar]

P_c: Presión en punto crítico [bar]

P_{L→G}: Presión de vapor en la temperatura de cambio de fase [mm Hg]

T: Temperatura [K]

T_{L→G}: Temperatura de ebullición [K] (a 1 bar)

T_{S→L}: Temperatura de fusión [K] (a 1 bar)

T_c: Temperatura crítica [K]

ΔH_{L→G}: Entalpía de cambio de fase líquido → gas [kJ·kg⁻¹] (a 1,013 bar)

ρ_{gas ideal}: Densidad del gas ideal [kg·m⁻³]

ρ_{líquido}: Densidad del líquido [kg·m⁻³] (a 1,013 bar)

C_p: Calor específico [J·mol⁻¹·K⁻¹]

λ_{teórica}: Conductividad térmica (teórica) [W·m⁻¹·K⁻¹]

μ_{teórica}: Viscosidad dinámica (teórica) [Pa.s]



II.3. Bases de datos

Tabla 12. Datos físicos generales del tritio. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

1 becquerel (Bq) = 1 desintegración/s = 2.7×10^{-11} Ci
1 Ci = 3.7×10^{10} desintegración /s = 3.7×10^{10} Bq = 37 GBq
Número de Avogadro = 6.023×10^{23} molecs/mol
Condiciones STP: 760 Torr y 0 C (1 atm y 273K)
1 mol de gas ideal a STP = 22.414 L a 0 C y 24.465 L/mol a TA.
1 Sievert (Sv) = 8.38 roentgens = 100 rem
Decaimiento de Tritio a ^3He + beta + neutrino
Semi-Vida radioactiva (para conteo) = 12.33 +/- 0.06
Factor de decaimiento de Tritio = 0.99984601%/d
Energía beta máxima de decaimiento (E_{max}) = 18.6 keV
Energía beta media de decaimiento (E_{m}) = 5.69 keV
Volumen de 1 Ci de Tritio a STP = 0.3863 mL
Tritio gas (T_2) = 9619 Ci/g
T_2 gas contiene 58022.77 Ci/mol
2590.3 Ci/cm ³ de T_2 a STP
Diámetro de un átomo de tritio (aproximado) = 1.1 Angstroms
Energía de disociación, $T_2 \rightarrow 2T$ = 4.59 eV
Energía de Ionización $T \rightarrow T^+ + e^-$ = 13.55 eV
Peso Atómico = 3.01605
Peso molecular del tritio = 6.0321 g
Densidad del tritio (STP) = 0.269290 g/L (3.71579 L/g)
Punto de ebullición del tritio a 1 atmósfera = 25.0 K
T_2 gas, a 1 atmósfera y 25 C = 2.372 Ci/cm ³
Agua tritiada: T_2O = 3200 Ci/cm ³

Tabla 13. Propiedades termofísicas básicas del hidrógeno (H₂), tritio elemental (HT) y tritio (T₂). (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

	H ₂	HT	T ₂
M [kg·mol⁻¹]	2,016·10 ⁻³	4,025·10 ⁻³	6,032·10 ⁻³
ρ_{gas ideal} [kg·m⁻³]	2,425·10 ⁻⁴ ·(P/T)	4,844·10 ⁻⁴ ·(P/T)	7,259·10 ⁻⁴ ·(P/T)
ρ_{líquido} [kg·m⁻³]	70,849 (a 20,37K)	166,86 (a 25,4K)	223,81 (a 25,04K)
ΔH_{L→G} [kJ·kg⁻¹]	468,69	328,9	290
C_p [J·kg⁻¹·K⁻¹]	14.435	7.226	4.823
λ_{teórica} [W·m⁻¹·K⁻¹]	2,142·10 ⁻³ ·T ^{0,769}	1,226·10 ⁻³ ·T ^{0,653}	1,619·10 ⁻³ ·T ^{0,653}
μ_{teórica} [Pa·s]	1,035·10 ⁻⁷ ·T ^{0,768}	2,800·10 ⁻⁷ ·T ^{0,653}	3,1323·10 ⁻⁷ ·T ^{0,653}

Tabla 14. Propiedades termo-isotópicas básicas. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

	H ₂	HD	HT	D ₂	DT	T ₂
M [uma]	2,016	3,022	4,025	4,029	5,032	6,036
T_{L→G} [K]	20,39	22,14	22,92	23,67	24,38	25,04
T_{S→L} [K]	13,96	16,60	17,62	18,73	19,71	20,62
P_{L→G} [mm Hg]	54,00	92,8	109,5	128,6	145,7	162,0
T_c [K]	33,24	35,91	37,13	38,35	39,42	40,44
P_c [bar]	12,96	14,84	15,70	16,64	17,72	18,49

Tabla 15. Punto de ebullición y presión de vapor de las especies oxidadas. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

	H ₂ O	T ₂ O	HTO
T [°C]	100,00	101,51	101,8
P_{vapor} [mm Hg] a 25°C	23,76	19,8	17,2

Tabla 16. Formas oxidadas: presiones de vapor isotópicas en T: P_{H₂O}/P_(x). (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

Temperatura [°C]	H ₂ O	T ₂ O	HTO
25	1	1,193	1,095
50	1	1,134	1,065
100	1	1,064	1,030

Tabla 17. Formas oxidadas: constantes de equilibrio isotópico. (CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial), 2014)

	300°C	350°C	400°C	450°C	500°C
H₂ + T₂ ↔ 2HT	4,83	-	5,27	-	5,49
HT + H₂O ↔ H₂ + HTO	2,058	1,879	1,741	1,632	1,545
T₂ + H₂O ↔ HT + HTO	10,09	-	9,16	-	8,34



La diferencia de masa en los isótopos del hidrógeno (protio, deuterio y tritio) conduce a ligeras diferencias isotópicas en las magnitudes termodinámicas físicas y químicas. Teóricamente, las reacciones químicas más lentas se producen con los isótopos más pesados.



Anexo III. Magnitudes dosimétricas para el tritio y sus formas

Las magnitudes dosimétricas se utilizan para describir los efectos de la radiación en los tejidos y órganos del cuerpo humano. En este apartado se realiza una pequeña recopilación de las distintas magnitudes dosimétricas y de sus unidades para el tritio y sus formas, que se irán utilizando a lo largo de este trabajo.

III.1. Introducción

Pocos meses después de que Roentgen descubriera los rayos X en 1895 y poco después del comienzo del trabajo con elementos radiactivos en 1896, se hizo necesario el establecimiento de una serie de normas de protección contra los efectos biológicos perjudiciales en el ser humano. Como consecuencia del trabajo con radiaciones ionizantes, algunos operadores en este campo empezaron a manifestar efectos nocivos en su salud. Por este motivo se analizaron los síntomas patológicos en un conjunto de radiólogos, lo que permitió establecer en 1922 que la incidencia de cáncer en este grupo de personas era mayor que el correspondiente a otras profesiones, lo que puso de manifiesto que las radiaciones ionizantes eran dañinas, haciendo necesario el establecimiento de unas normas específicas de radioprotección.

En 1925 se crea la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación (ICRU), que se ocupa principalmente de la definición formal de las magnitudes y unidades radiológicas, así como del desarrollo de recomendaciones internacionalmente aceptables acerca del uso de dichas magnitudes y de los métodos adecuados para su medida. Por otra parte, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) se ocupa de establecer recomendaciones semejantes en relación con la protección radiológica (CSN, Magnitudes y unidades radiológicas, 2009).

III.2. Dosimetría

La dosimetría trata (CSN, Magnitudes y unidades radiológicas, 2009) con magnitudes que están relacionadas con la medida de la energía absorbida así como con su distribución. Entre ellas destacan:



“**Exposición**” **X en un punto**, definida (Butí, 1990) a partir de:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad (26)$$

Donde ΔQ es la suma de las cargas eléctricas de un mismo signo, generadas por los electrones secundarios liberados por las interacciones de los fotones (radiación primaria) habidas en un elemento de volumen de aire cuya masa es Δm . Se trata de una magnitud únicamente utilizable en campos de fotones y en aire.

La unidad en el S.I. de la exposición es el $C \cdot kg^{-1}$. La unidad antigua y hoy obsoleta es el “roentgenio” (R) (Butí, 1990), siendo la equivalencia entre ambas unidades:

$$1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$$

“**Tasa de exposición**” **\dot{X} en un punto**, definida (Butí, 1990) como el incremento de exposición dX durante el intervalo de tiempo dt .

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (27)$$

Cuya unidad en el S.I. es el $C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$.

“**Kerma**” **K en un punto**, definida (Butí, 1990) de acuerdo con la relación:

$$K = \frac{\Delta E_{tr}}{\Delta m} \quad (28)$$

Siendo ΔE_{tr} la suma de la energía transferida, en forma de energía cinética inicial, de todas las partículas ionizantes cargadas, liberadas por partículas ionizantes no cargadas, en un material de masa Δm .

La unidad, en el S.I., es el $J \cdot kg^{-1}$ que recibe el nombre especial de gray (Gy), en homenaje a este científico. **Kerma** es el apócope de “**K**inetic **E**nergy **R**eleased per Unit **M**ass”.



“**Tasa de kerma**” \dot{K} **en un punto**, definida (Butí, 1990) como la variación de kerma dK en el intervalo de tiempo dt .

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} \quad (29)$$

Cuya unidad en el S.I. es el $J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ o $Gy \cdot s^{-1}$.

“**Dosis absorbida**” D **en un punto**, definida (Butí, 1990) según:

$$D = \frac{\Delta\bar{\epsilon}}{\Delta m} \quad (30)$$

Siendo $\Delta\bar{\epsilon}$ la energía impartida media por la radiación (primaria y secundaria) en un elemento de volumen de un medio cualquiera, de masa Δm . La unidad, en el S.I. es el $J \cdot kg^{-1}$ o Gy .

La dosis absorbida es mayor cuanto más tiempo permanece el tritio en el organismo y decrece a medida que éste se desintegra o es eliminado a través de la exhalación, sudor u orina.

“**Tasa de dosis absorbida**” \dot{D} **en un punto**, definida (Butí, 1990) como el incremento de la dosis absorbida dD en el intervalo de tiempo dt .

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (31)$$

Cuya unidad en el S.I. es el $Gy \cdot s^{-1}$, es decir, el $W \cdot kg^{-1}$.

III.3. Radioprotección

La radioprotección trata (CSN, Magnitudes y unidades radiológicas, 2009) con magnitudes que están relacionadas con el efecto biológico de las magnitudes dosimétricas, y que atienden tanto al tipo de radiación como a la naturaleza del medio irradiado.

“**Dosis equivalente o equivalente de dosis**” H , en un punto de un órgano o tejido se define (Butí, 1990) como el producto:

$$H = Q \cdot D \cdot N \quad (32)$$



Donde D es la dosis absorbida, siendo Q y N dos factores adimensionales. El factor Q o “factor de calidad” de la radiación, depende del tipo de partículas y de su transferencia lineal de energía, véase Tabla 18. El factor N, que engloba a su vez otros varios (factores modificantes), sólo se utiliza en la determinación de las dosis equivalentes en órganos y tejidos biológicos, producidas por contaminación interna mediante incorporaciones (vía inhalación o ingestión) de radionucleidos. Estos casos tienen interés cuando la radiación primaria está constituida por partículas cargadas (alfas, betas, etc.) y en ellos el factor N tiene en cuenta la distribución geométrica de los radionucleidos, los alcances, las ionizaciones específicas y los valores de la transferencia lineal de energía de las partículas del campo en el seno de los tejidos. No obstante, es oportuno adelantar que en la mayoría de los casos propios de la ingeniería se tratan aspectos relacionados con las dosis producidas por irradiación externa, para los cuales se adopta $N = 1$ (Butí, 1990).

Tabla 18. Factor de Calidad según el tipo de radiación (Butí, 1990).

Valores del factor Q para cada tipo de radiación recomendados, en 1970	
Fotones	1
Rayos X	1
Electrones con $E \geq 0,03$ MeV	1
Positrones con $E \geq 0,03$ MeV	1
Partículas beta con $E \geq 0,03$ MeV	1
Electrones y partículas beta con $E < 0,03$ MeV	1,7
Protones	10
Partículas alfa	10
Núcleos pesados	20
Neutrones térmicos	3
Neutrones de 6 KeV	2,5
Neutrones de 20 KeV	5,0
Neutrones de 100 KeV	8,0
Neutrones de 500 KeV	10,0
Neutrones de 1 MeV	10,5
Neutrones de 5 MeV	7,0
Neutrones de 10 MeV	6,5
Valores del factor Q para cada tipo de radiación recomendados, en 1984	
Fotones, rayos X y electrones	1
Neutrones térmicos	2,3
Neutrones, protones y partículas con una carga eléctrica de masa en reposo superior a una unidad de masa atómica de energía desconocida	10
Partículas alfa y partículas con varias cargas eléctricas (o de carga desconocida) y de energía desconocida	20

De acuerdo con los estudios realizados, ICRP recomienda una relación entre el factor de calidad Q y la transferencia lineal de energía¹⁷ o poder de frenado lineal, L , para un material como el agua (ICRP-60, 1991). En la Figura 39 se muestra la representación gráfica.

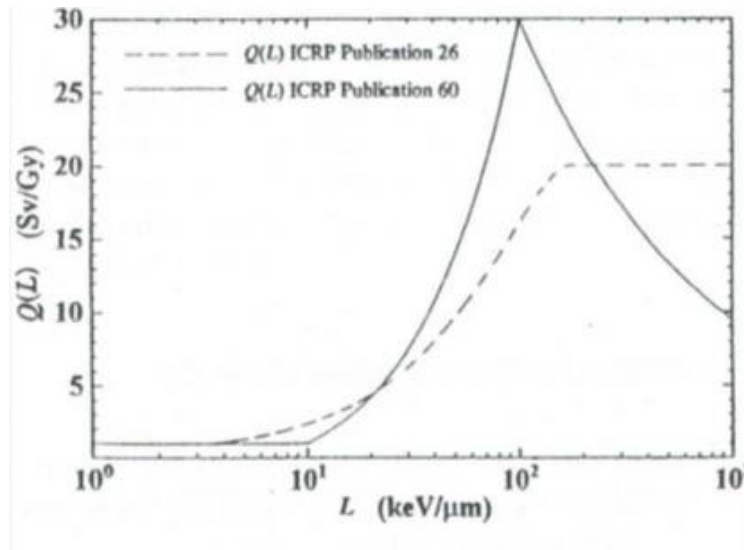


Figura 39. Factor de calidad, Q . (ICRP-60, 1991)

La unidad en el S.I. es el $J \cdot kg^{-1}$ y su nombre especial es el sievert (Sv).

La “tasa de dosis equivalente” \dot{H} , se (Butí, 1990) definirá de acuerdo con:

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad (33)$$

Cuya unidad, en el S.I., es el $Sv \cdot s^{-1}$.

III.3.1 Magnitudes limitadoras para la radioprotección

Las magnitudes limitadoras se utilizan para establecer límites máximos con la finalidad de proteger a los seres humanos de los posibles efectos nocivos que pueden producir las radiaciones ionizantes. Estas magnitudes son valores medios, que se promedian sobre una masa extensa, como puede ser un órgano o un tejido humano. Las

¹⁷ Transferencia lineal de energía, L , es (Mayol, 2004) la energía impartida por la radiación, E , localmente al medio en una longitud, x , a lo largo de la trayectoria de la partícula, i . Está definida por:

$$L = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_i$$

La unidad es el $J \cdot m^{-1}$.



dos magnitudes actualmente en uso fueron introducidas por ICRP en 1991 (ICRP-60, 1991).

La “**dosis equivalente en un órgano o tejido T debida a la radiación R**” $H_{T,R}$ se define (ICRP-60, 1991) como:

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad (34)$$

Donde $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media para la radiación R en el órgano o tejido T y w_R es el factor de ponderación para la radiación R. Para el caso de campos de radiación compuestos por diferentes tipos de partículas y energías, la expresión más general de la dosis equivalente en un órgano H_T es:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (35)$$

La unidad para la dosis equivalente en un órgano o tejido es el sievert (Sv).

Los factores de ponderación recomendados para los distintos tipos de radiaciones ionizantes han sido modificados con respecto a los anteriores de ICRP 60 (1991) y son los que se muestran a continuación en la Tabla 19.

Tabla 19. Factores de ponderación de radiación recomendados (ICRP-103, 2007).

Tipo de radiación	Factor de ponderación de la radiación w_R
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, fragmentos de fisión, iones pesados	20
Neutrones	Una función continua de la energía del neutrón (ver Figura 40)

Todos los valores están relacionadas a la radiación incidente en el cuerpo o, para las fuentes de radiación internas, emitidas por radionucleido(s) incorporado(s).

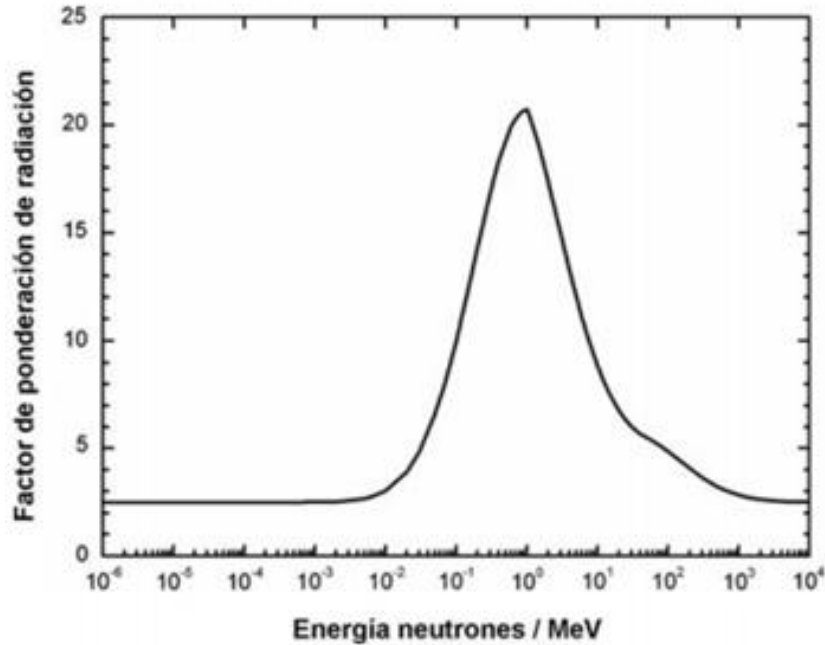


Figura 40. Factor de ponderación w_R para neutrones en función de la energía de los neutrones (ICRP-103, 2007).

No obstante, los que siguen estando vigentes son los que se muestran en la Tabla 20:

Tabla 20. Factores ponderales de radiación (ICRP-60, 1991).

Tipo de radiación	w_R
Fotones de todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones con energías,	
< 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protones, salvo los de retroceso, de energías mayores que 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión y núcleos pesados	20

La “dosis efectiva” E , se define (ICRP-60, 1991) como:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_{T,R} w_T \cdot w_R \cdot D_{T,R}$$

(36)



Donde H_T es la dosis equivalente media recibida en un órgano o tejido T y w_T es el factor de ponderación aplicado a cada tejido u órgano afectado, con la condición:

$$\sum_T w_T = 1$$

(37)

Los factores de ponderación recomendados para los distintos órganos del cuerpo humano, actualizados según las últimas recomendaciones de ICRP, se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Factores de ponderación de los tejidos recomendados (ICRP-103, 2007).

Tejido	w_T	Σw_T
Médula ósea, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos*	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivares, piel	0,01	0,04
Total		1,00

*Resto de los tejidos: Adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix

No obstante, los valores que aún siguen vigentes son los que se muestran en la Tabla 22:

Tabla 22. Factores ponderales de tejido (ICRP-60, 1991).

Tejido u órgano	w_T
Gónadas	0,20
Médula ósea (roja)	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Estómago	0,12
Vejiga	0,05
Mamas	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroides	0,05
Piel	0,01
Superficie ósea	0,01
Resto	0,05

III.3.2 Dosis equivalente y dosis efectiva comprometida

El resultado inmediato de la exposición a un campo externo de radiación es una deposición de energía en cada órgano o tejido. No obstante, cuando un determinado



radionucleido se incorpora en el cuerpo humano, la irradiación interna se extiende en el tiempo, produciéndose de este modo un depósito de energía a medida que el nucleido decae en el interior del organismo. Para tener en cuenta este comportamiento se recomienda el uso de la “**dosis equivalente comprometida**”, definida (Magnitudes dosimétricas) como la integral, en un período de tiempo dado, de la tasa de dosis equivalente en un determinado tejido que será recibida por un individuo tras una incorporación de material radiactivo.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt \quad (38)$$

Donde, \dot{H}_T es la tasa de dosis equivalente en un tejido u órgano T, al tiempo t, y τ es el periodo de tiempo sobre el cual se efectúa la integración. Cuando τ no está especificado, se toma igual a 50 años para adultos y, en el caso de niños, se integra hasta la edad de 70 años.

La unidad en el sistema internacional es el Sv.

Si las dosis equivalentes comprometidas en cada órgano o tejido se multiplican por los correspondientes factores de ponderación w_T , y se suman dichos productos, se obtiene la “**dosis efectiva comprometida**” (Magnitudes dosimétricas), cuya unidad en el sistema internacional es el Sv.

$$E(\tau) = \sum_T w_T \cdot H_T(\tau) \quad (39)$$

III.3.3. Magnitudes colectivas para grupos de individuos expuestos

Los criterios de radioprotección han sufrido en los últimos años una importante reorientación, ya que ahora valoran lo que podría denominarse el “**impacto colectivo de las radiaciones**” en las poblaciones humanas afectadas (Butí, 1990). Con anterioridad, uno de los criterios básicos del diseño u operación de las instalaciones radiactivas y nucleares consistía en la minimización de las dosis recibidas por las personas individuales potencialmente más afectadas (persona crítica, camino crítico, órgano crítico, etc).

La nueva orientación, sin desdeñar este enfoque individual, hace énfasis en la necesidad de valorar el riesgo colectivo del conjunto de la población. Para ello ha



resultado necesario introducir unas nuevas magnitudes que sean representativas de este daño o impacto colectivo, las cuales se analizan a continuación (Butí, 1990).

La “**dosis equivalente colectiva comprometida**” S_T , para una población determinada se define como:

$$S_T = \int_0^{\infty} H_T \cdot \frac{dN}{dH_T} \cdot dH_T \quad (40)$$

Donde, $(\frac{dN}{dH_T} \cdot dH_T)$ es el número de individuos que reciben dosis equivalente comprendida en el intervalo H_T y $H_T + dH_T$.

La forma discreta de expresar esta magnitud es la siguiente:

$$S_T = \sum_i \bar{H}_{T,i} \cdot N_i \quad (41)$$

Donde N_i es el número de individuos en el subgrupo i -ésimo de la población, que reciben una dosis equivalente media en el órgano T igual a $\bar{H}_{T,i}$. Esta magnitud representa una cuantificación global de la dosis recibida por la población.

La unidad en el sistema internacional es el Sv·persona.

La “**dosis efectiva colectiva**” S , total a una cierta población viene definida como:

$$S = \sum_i \bar{E}_i \cdot N_i \quad (42)$$

Donde \bar{E}_i es la dosis efectiva promedio en subgrupo de población i y N_i es el número de individuos del subgrupo.

Si en el grupo existen diferentes exposiciones puede utilizarse la expresión como integral:

$$S = \int_0^{\infty} E \cdot \frac{dN}{dE} \cdot dE \quad (43)$$



Donde $\left(\frac{dN}{dE} \cdot dE\right)$ es el número de individuos expuestos que reciben una dosis efectiva comprometida entre E y E + dE.

La unidad en el sistema internacional es el Sv·persona.

Anexo IV: Detalles huerto-invernadero

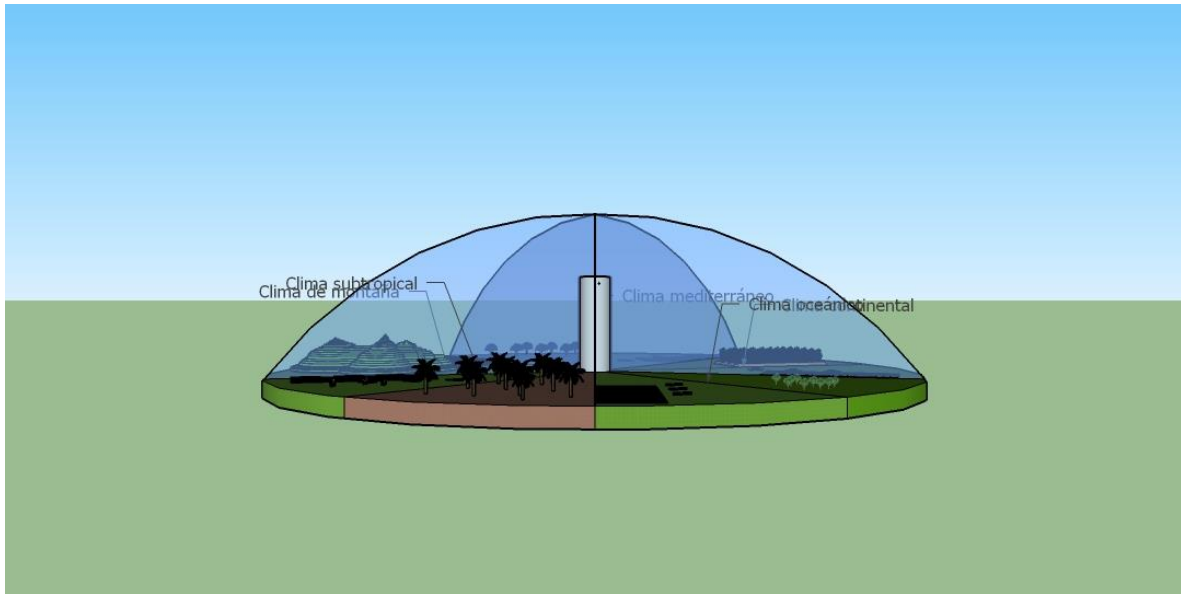


Figura 41. Huerto invernadero. Vista frontal.

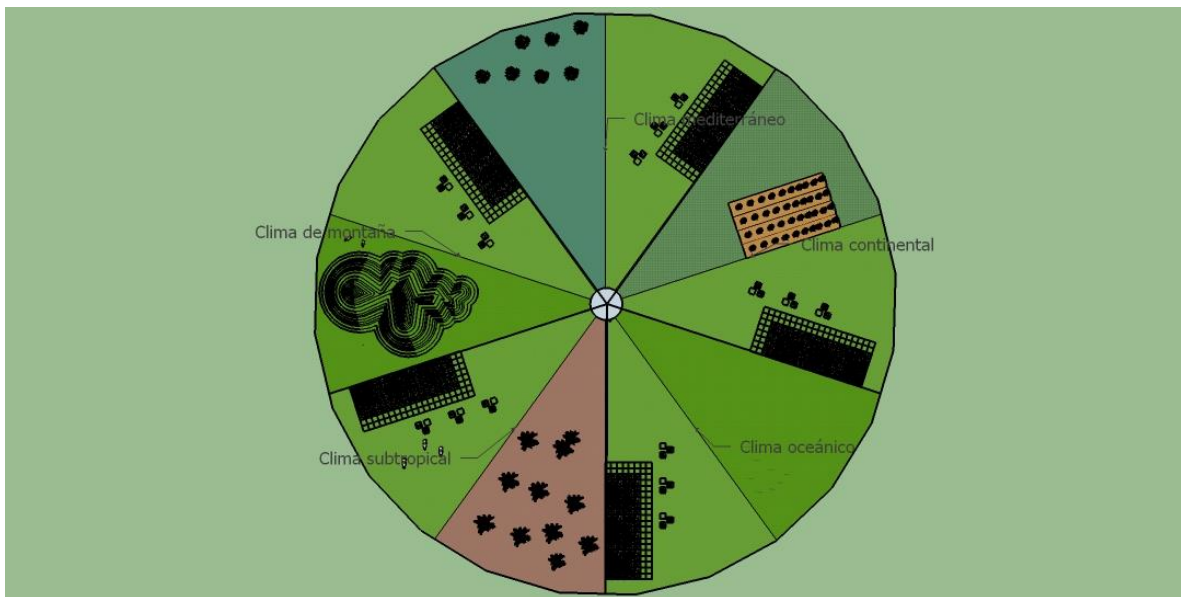


Figura 42. Huerto invernadero. Vista planta.

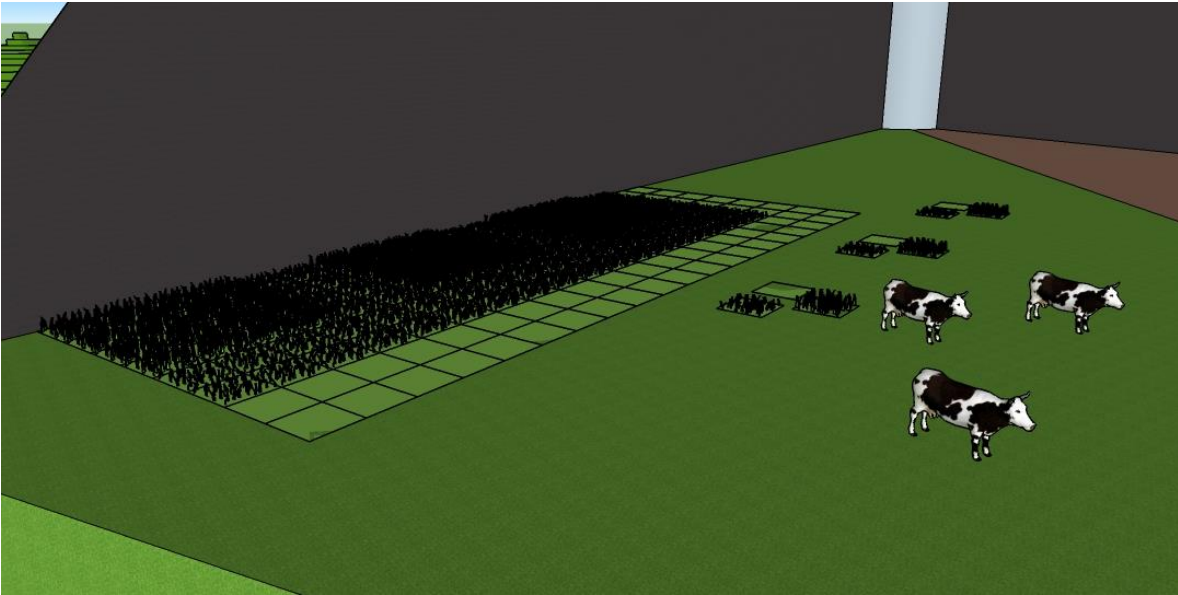


Figura 43. Detalle suelo cultivable.

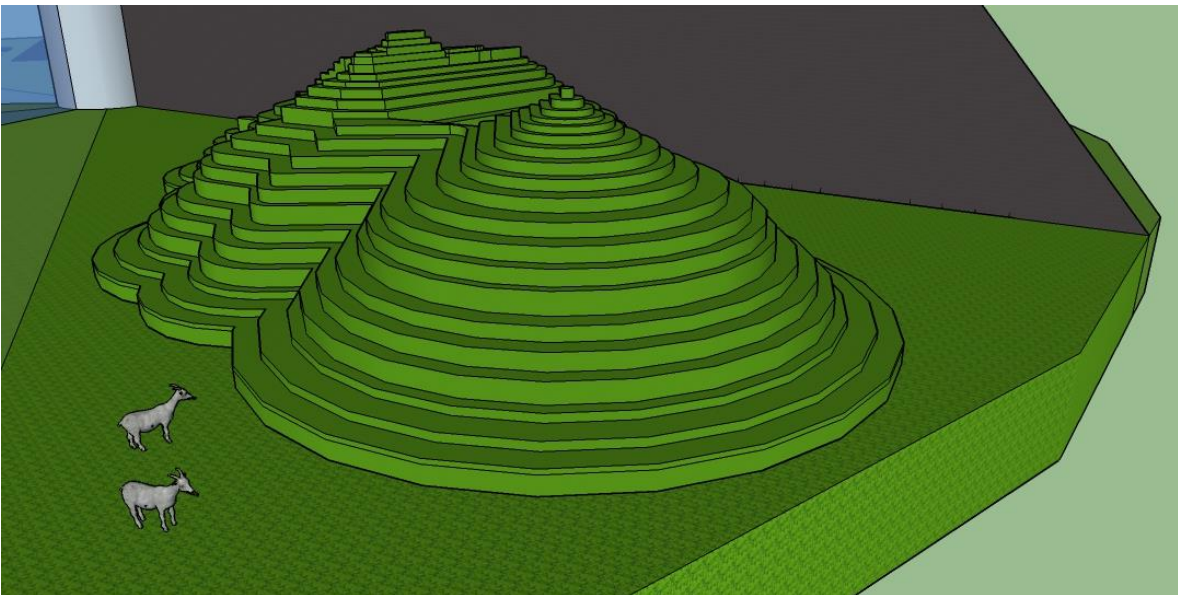


Figura 44. Detalle clima de montaña.

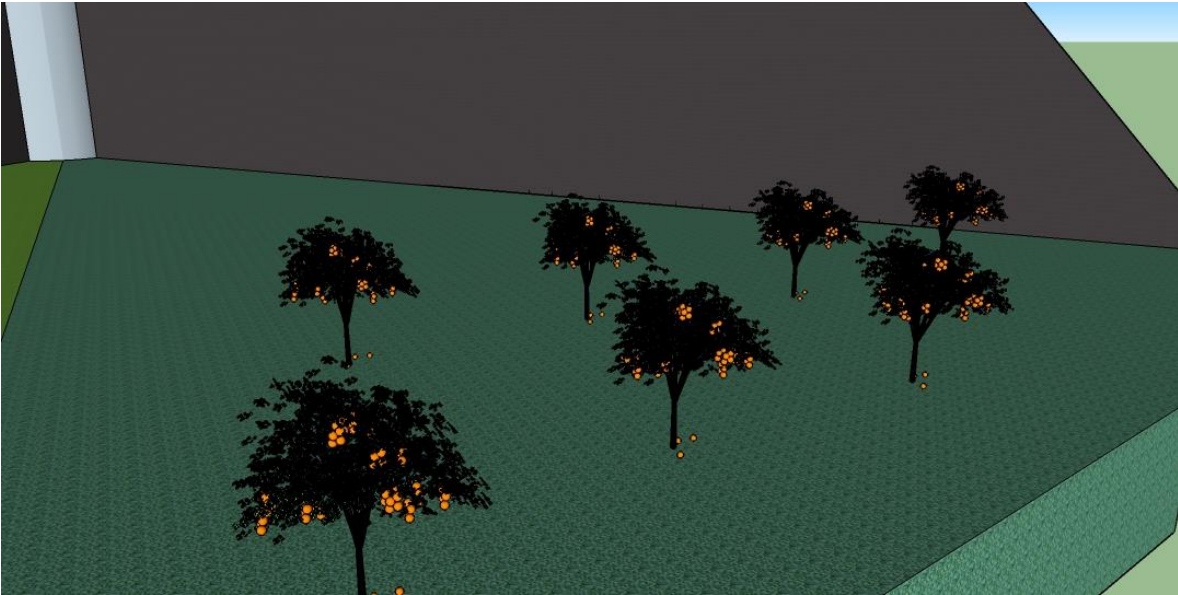


Figura 45. Detalle clima mediterráneo.



Figura 46. Detalle clima oceánico.

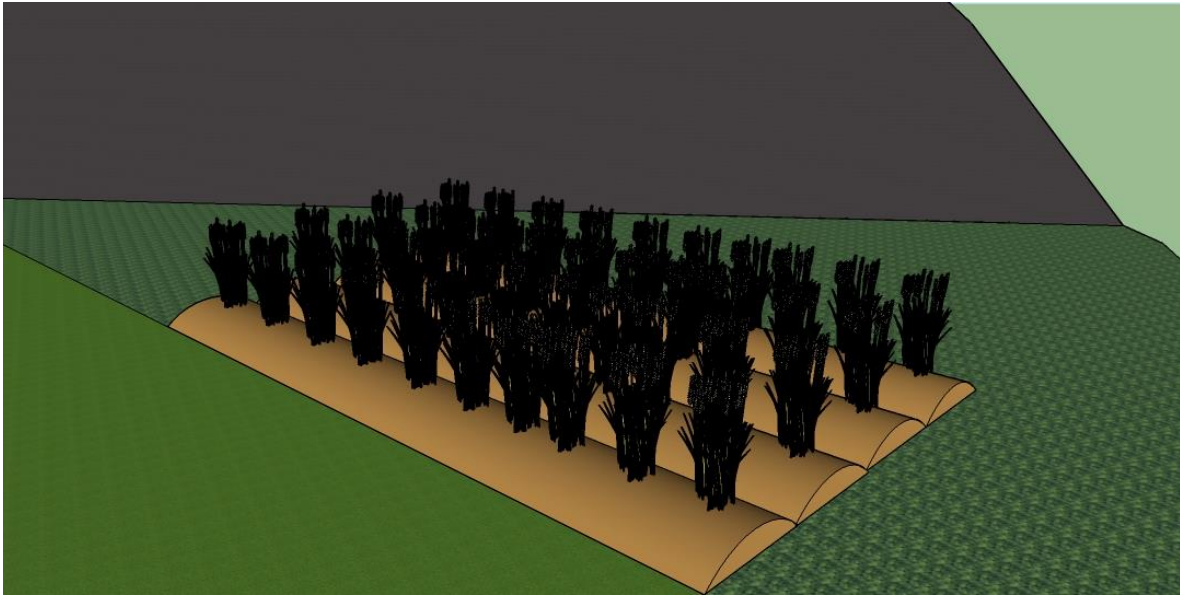


Figura 47. Detalle clima continental.

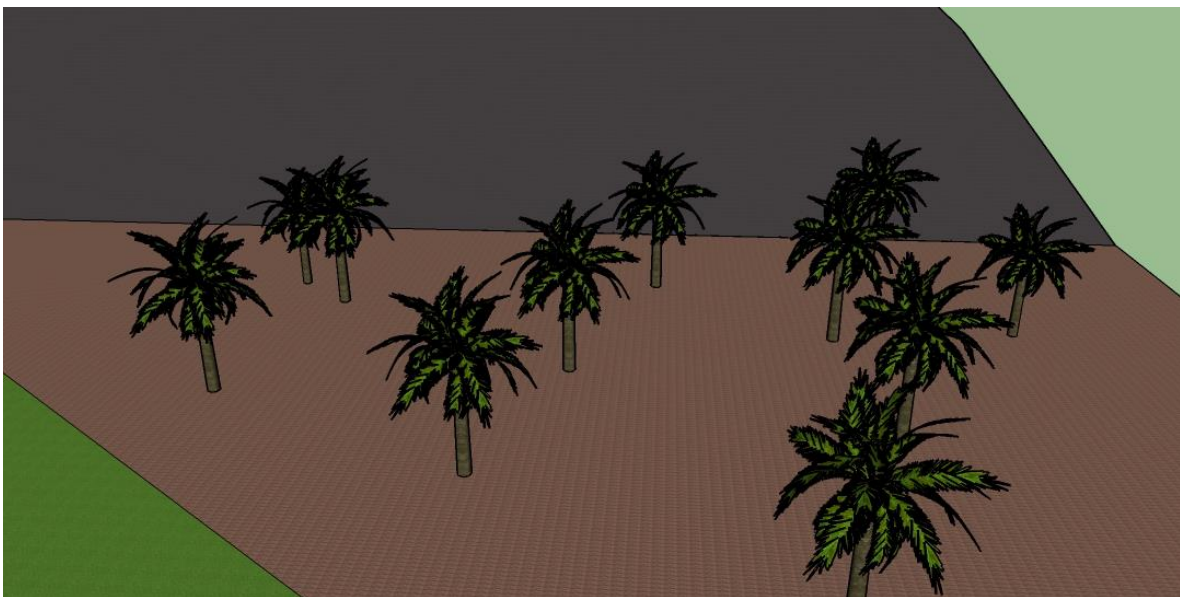


Figura 48. Detalle clima subtropical.



Figura 49. Detalle ventilador y lámpara.



Anexo V: Programa TRITIOVI.xmcd

PROGRAMA TRITIOVI: CALCULO DE DOSIS AMBIENTALES TRITIO EN MEDIO AMBIENTE



Mar López.
Trabajo Fin de Máster. Máster de Minas (Oviedo)
CURSO 2015-2016

DATOS TRITIO

$$\lambda = 1.54 \cdot 10^{-4} \quad \text{En 1 día}$$

$$\frac{\ln(2)}{12.3365} = 1.544 \times 10^{-4} \quad \text{1 gr. de tritio} = 9600 \text{ Ci} = 9600 \cdot 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

SUBMODELO 1. SUBMODELO DE FUENTE Y EMISION

Término fuente nominal. Q [gr] de tritio (en toda forma)

tiempo de emisión TT [segundos] de fuente

$$TT = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \quad Q = 1$$

$$E_s = 10^7$$

$$AHT = \frac{Q}{TT} \cdot 9600 \cdot 3.7 \cdot 10^{10} \quad AHTO = \frac{0.1 \cdot Q}{TT} \cdot 9600 \cdot 3.7 \cdot 10^{10} \quad QQ = \frac{Q}{TT}$$

Velocidad viento anemometro [m /s] $uref = 2$
Altura-posicion anemometro zref [m] $zref = 20$
Altura-posicion chimenea h (x,y) [m] $h = 120$
Temperatura de salida de emisión Ts [K] $Ts = 400$
Temperatura de aire entorno-fuente Taire [K] $Taire = 293$
Velocidad de emisión fuente Vs [m/s] $Vs = 5$
Sección salida chimenea SS [m2] $SS = 10$



Comentario#1. TT es tiempo de emisión (1 año en segundos)
Comentario#2. F es la emisión anual de la chimenea (10^7 m3/año)
Comentario#3. AHT es 1gr de T en forma HT por año [Bq/año]
Comentario#4. AHTO es 0.1gr de T en forma HTO por año [Bq/año]

SUBMODELO 2. SUBMODELO DE DISPERSION ATMOSFERICA

DATOS METEOROLOGICOS

Introduzca gradiente vertical. [K /m] $vertgrad = 2$

CALCULO CLASE DE ESTABILIDAD

$$CLEST(vertgrad) = \text{if}(vertgrad < -1.9, "CLASEA", \text{if}(-1.9 < vertgrad < -1.7, "CLASEB", \text{if}(-1.7 < vertgrad < -1.5, "CLASEC", \text{if}(-1.5 < vertgrad < -0.5, "CLASED", \text{if}(-0.5 < vertgrad < 1.5, "CLASEE", \text{if}(vertgrad > 1.5, "CLASEF", "CLASFFF"))))$$

CALCULO VELOCIDAD DEL VIENTO ALTURA DE CHIMENEA

$$p(vertgrad) = \text{if}(vertgrad < -1.9, 0.15, \text{if}(-1.9 < vertgrad < -1.7, 0.15, \text{if}(-1.7 < vertgrad < -1.5, 0.2, \text{if}(-1.5 < vertgrad < -0.5, 0.4, \text{if}(1.5 < vertgrad, 0.6, 0))))))$$

CALCULO DE FACTOR DE FLOTABILIDAD "F" [m4/s3]

$$F_m = 9.81 \cdot \frac{SS}{\pi} \cdot Vs \cdot \left(1 - \frac{Taire}{Ts}\right)$$

$$F = 41.765$$

CALCULO DE FACTOR DE ESTABILIDAD "S" [s-2]

$$S(vertgrad) = \frac{9.81}{Taire} (vertgrad + 0.01)$$

$$S(vertgrad) = 0.067$$





CALCULO DESVIACIONES TIPICAS CON LA DISTANCIA X: σ_x, σ_y [m]

$$\begin{aligned}
 aa(\text{vertgrad}) &= \text{if}(\text{vertgrad} < -1.9, 213, \text{if}(-1.9 < \text{vertgrad} < -1.7, 156, \text{if}(-1.7 < \text{vertgrad} < -1.5, 104, \text{if}(-1.5 < \text{vertgrad} < -0.5, 68, \text{if}(-0.5 < \text{vertgrad} < 1.5, 30.5, \text{if}(1.5 < \text{vertgrad}, 34, 0)))))) \\
 cc1(\text{vertgrad}) &= \text{if}(\text{vertgrad} < -1.9, 440.8, \text{if}(-1.9 < \text{vertgrad} < -1.7, 106.6, \text{if}(-1.7 < \text{vertgrad} < -1.5, 61, \text{if}(-1.5 < \text{vertgrad} < -0.5, 33.2, \text{if}(-0.5 < \text{vertgrad} < 1.5, 22.8, \text{if}(1.5 < \text{vertgrad}, 14.35, 0)))))) \\
 dd1(\text{vertgrad}) &= \text{if}(\text{vertgrad} < -1.9, 1.941, \text{if}(-1.9 < \text{vertgrad} < -1.7, 1.149, \text{if}(-1.7 < \text{vertgrad} < -1.5, 0.911, \text{if}(-1.5 < \text{vertgrad} < -0.5, 0.725, \text{if}(-0.5 < \text{vertgrad} < 1.5, 0.678, \text{if}(1.5 < \text{vertgrad}, 0.740, 0)))))) \\
 ff1(\text{vertgrad}) &= \text{if}(\text{vertgrad} < -1.9, 9.27, \text{if}(-1.9 < \text{vertgrad} < -1.7, 3.3, \text{if}(-1.7 < \text{vertgrad} < -1.5, 0, \text{if}(-1.5 < \text{vertgrad} < -0.5, -1.7, \text{if}(-0.5 < \text{vertgrad} < 1.5, -1.3, \text{if}(1.5 < \text{vertgrad}, -0.35, 0)))))) \\
 cc2(\text{vertgrad}) &= \text{if}(\text{vertgrad} < -1.9, 459.7, \text{if}(-1.9 < \text{vertgrad} < -1.7, 108.2, \text{if}(-1.7 < \text{vertgrad} < -1.5, 61, \text{if}(-1.5 < \text{vertgrad} < -0.5, 44.5, \text{if}(-0.5 < \text{vertgrad} < 1.5, 55.4, \text{if}(1.5 < \text{vertgrad}, 62.6, 0)))))) \\
 dd2(\text{vertgrad}) &= \text{if}(\text{vertgrad} < -1.9, 2.094, \text{if}(-1.9 < \text{vertgrad} < -1.7, 1.098, \text{if}(-1.7 < \text{vertgrad} < -1.5, 0.911, \text{if}(-1.5 < \text{vertgrad} < -0.5, 0.516, \text{if}(-0.5 < \text{vertgrad} < 1.5, 0.305, \text{if}(1.5 < \text{vertgrad}, 0.180, 0)))))) \\
 ff2(\text{vertgrad}) &= \text{if}(\text{vertgrad} < -1.9, -9.6, \text{if}(-1.9 < \text{vertgrad} < -1.7, 2, \text{if}(-1.7 < \text{vertgrad} < -1.5, 0, \text{if}(-1.5 < \text{vertgrad} < -0.5, -13, \text{if}(-0.5 < \text{vertgrad} < 1.5, -34, \text{if}(1.5 < \text{vertgrad}, -48.6, 0)))))) \\
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{sigmay}(x, \text{vertgrad}) &= aa(\text{vertgrad}) \cdot x^{0.894} \\
 \text{sigmaz}(x, \text{vertgrad}) &= \text{if}(x \leq 1, cc1(\text{vertgrad}) \cdot x^{dd1(\text{vertgrad})} + ff1(\text{vertgrad}), \text{if}(x > 1, cc2(\text{vertgrad}) \cdot x^{dd2(\text{vertgrad})} + ff2(\text{vertgrad}, 0))
 \end{aligned}$$

CALCULO DE DISTANCIA DE "NO SOBREELEVACIÓN" x_f [m]

$$\begin{aligned}
 x_f &= \text{if}(F < 55, 3.5 \cdot 14 \cdot F^{\frac{5}{8}}, 3.5 \cdot 34 \cdot F^{0.4}) \\
 \frac{x_f}{z_{\text{ref}}} &= \frac{3.14 \cdot \text{uref}}{\sqrt{S(\text{vertgrad})}}
 \end{aligned}$$

CALCULO DE ESPESOR EFECTIVO DE PENACHO dh [m]

$$dh(\text{vertgrad}, x) = \text{if}(\text{vertgrad} < -0.5, \text{if}(x < \text{if}(F < 55, 3.5 \cdot 14 \cdot F^{\frac{5}{8}}, 3.5 \cdot 34 \cdot F^{0.4}), \frac{1}{1.6 \cdot F^{\frac{2}{3}} \cdot x^{\frac{2}{3}}}, \frac{1}{1.6 \cdot F^{\frac{2}{3}} \cdot x_f^{\frac{2}{3}}}), \text{if}(x > \frac{3.14 \cdot \text{uref}}{\sqrt{S(\text{vertgrad})}}, 5 \cdot F^{0.25} \cdot S(\text{vertgrad})^{\frac{-3}{8}}, 2.3 \cdot (\frac{F}{\text{uref} \cdot S(\text{vertgrad})})^{\frac{1}{3}}))$$

CALCULO DE ESPESOR EFECTIVO DE PENACHO dh [m]

$$\begin{aligned}
 U(\text{vertgrad}, x) &= \text{uref} \cdot \left(\frac{h + dh(\text{vertgrad}, x)}{z_{\text{ref}}} \right)^{p(\text{vertgrad})} \\
 CC(x, y, z) &= \frac{QQ}{2 \cdot \pi \cdot U(\text{vertgrad}, x) \cdot \text{sigmay}(x, \text{vertgrad}) \cdot \text{sigmaz}(x, \text{vertgrad})} \cdot \exp\left[\frac{-(y)^2}{2 \cdot 10^6 \cdot (\text{sigmay}(x, \text{vertgrad}))^2} \right] \cdot \exp\left[\frac{-(z - h)^2}{2 \cdot 10^6 \cdot (\text{sigmaz}(x, \text{vertgrad}))^2} \right] \\
 \chi(x, y, z) &= \frac{CC}{3 \cdot \pi \cdot U(\text{vertgrad}, x) \cdot \text{sigmay}(x, \text{vertgrad}) \cdot \text{sigmaz}(x, \text{vertgrad})} \\
 \chi &= 10^{-7}
 \end{aligned}$$

SUBMODELO 3. SUBMODELO DE TRANSF. A SUELO Y DEPOSICION

$$\begin{aligned}
 FD &= 10 \\
 \text{CONTACTODOSISCOSTA} &= 10^{-26} \\
 Kc &= 100 \\
 SF &= 0.7 \\
 tb &= 5475 \quad n = 0.5
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 DD1(x, \text{CLEST}(\text{vertgrad})) &= \frac{16 \cdot \text{RR}(v, \text{CI_FKST}(\text{vertgrad}))}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot \left[\sum_n \{ff_1 \cdot DD_{1i}\} \right] \\
 DD &= (5 \cdot 10^{-8})
 \end{aligned}$$

SUBMODELO 4. SUBMODELO DE SUELO, SUBSUELO Y RE-EMISIÓN

$$\begin{aligned}
 \text{FRACAGUAVEG} &= 0.75 \\
 \text{ALFA} &= 0.5 \quad tp = 1 \\
 \text{TPR} &= 33 \\
 HA &= \frac{216.9}{273 + T_{\text{aire}}} \cdot \left(6.0634 \cdot \exp\left(\frac{17.13 \cdot \text{TPR}}{234 + \text{TPR}} \right) \right)
 \end{aligned}$$

CALCULO DE CONCENTRACION EN VEGETALES

$$\text{CONCVSH} = (\text{AHT} + \text{AHTO}) \cdot \left(\frac{x}{QQ} \right) \cdot \text{FRACAGUAVEG} \cdot \frac{\text{ALFA}}{HA} \cdot \frac{1}{3.15 \cdot 10^4}$$

CALCULO DE CONCENTRACION EN LECHE

$$\begin{aligned}
 FM &= 0.17 \quad QF = 30 \quad fp = 1 \quad fs = 0.5 \\
 \text{CVEGANIMAL} &= fp \cdot fs \cdot \text{CONCVSH} + (1 - fp) \cdot \text{CONCVSH} + fp \cdot (1 - fs) \cdot \text{CONCVSH} \\
 \text{CONCLECHE} &= FM \cdot \text{CVEGANIMAL} \cdot QF \cdot \exp(-\lambda \cdot ts)
 \end{aligned}$$

CALCULO DE CONCENTRACION EN CARNE

$$\begin{aligned}
 ts &= 20 \quad FF = 0.12 \\
 \text{CONCCARNE} &= FF \cdot \text{CVEGANIMAL} \cdot QF \cdot \exp(-\lambda \cdot ts)
 \end{aligned}$$

Comentario#7. Formulas de Briggs

Comentario#8. Para CLASES A-D $x_f = 504.899$

Comentario#9. Para CLASES E-F $x_f = 24.208$

Comentario#10. Escribimos de manera única para todas las CLASES los espesores

Comentario#11. Penacho gaussiano (aproximación)

Comentario#12. Las Guías Regulatorias (US NRC RG 1.145) proponen diversas simplificaciones para el computo de $\chi(x,y,z)$ (grs/m3), exactamente $CC(x,y,z)$. Cogemos la aproximación por razones de tiempo de calculo y por usar aprox. mayorantes

Comentario#13. FD es factor de dilución de agua marina (10 a 100)

Comentario#14. CONTACTODOSISCOSTA en (Sv/s)/(Bq/m2) Valor + penalizante para tritio (10⁻¹⁸). Dosis recibida por baño en agua de mar trititada

Comentario#15. KC: Transferencia agua de mar a sedimento | US NRC RG 1.109) = 100 l/m2/d

Comentario#16. SF es factor de protección de edificios

Comentario#17. tb tiempo en días de exposición del sedimento a agua trititada (15 años)

Comentario#18. DD1 es el coeficiente de deposición o flujo de transferencia pluma-suelo. Depende de la distancia y tiene dependencias distintas en función de las clases de estabilidad. Para una escritura exacta de DD1 necesitamos historica meteorologica y emplazamiento dado. Un valor en fuente de 10⁻⁸ es conservador.

Comentario#19. tp tiempo para transferir la dosis del pez al hombre en d

Comentario#20. CONCLECHUGAS es concentración de tritio en Vegetales de Hoja

Comentario#21. CONCCARNE es concentración de tritio en Carne en Dieta

Comentario#22. CONCAGUA es concentración de tritio en Agua de Consumo

Comentario#23. HA es la humedad absoluta y TPR es el punto de rocío

HA = 54.954

Comentario#24. CONCVSH es concentración de tritio en Vegetales Sin Hoja en Diet Suponemos equilibrio isotópico 0.5 aire y 0.75 de fracción de agua en hojas

Comentario#25. CONCLECHE es concentración de tritio en Leche de Dieta

Comentario#26. FM es la fracción de tritio contenida en el alimento animal que se tran: En las Guías Regulatorias US NRC RG 1.109) se establece 0.01 para vacas y 0.17 en cabra

Comentario#27. QF es la dieta animal: 50 kg/d (conservador) de pasto en vacas y 6 kg

Comentario#28. fp es factor anual de residencia del animal en el pasto (1 es conservac

Comentario#29. fs es factor de pasto en terreno donde el animal pasta (1 es conservad

CVEGANIMAL = 8.464

CONCLECHE = 71.935



CONCENTRACION EN AGUA DE CONSUMO

CONCAGUA = 100

SUBMODELO 5. SUBMODELO INCORPORACION TROFICA

BMARPEZ = 0.9
BMARMARISCO = 0.93

Comentario#30. ts tiempo desde sacrificio del animal a su consumo (20 dias)
Comentario#31. FF es la fracción de tritio contenida en el alimento animal que se transfiere a la carne. En las Guías Regulatorias US NRC RG 1.109) se establece 0.12 kg/d

SUBMODELO 6 SUBMODELO SOCIOECONOMICO Y HABITOS

UPESCA = 16.5
UMARISCO = 2
INGESTAVSH = 237
INGESTALECHE = 148
INGESTALECHUGAS = 22
INGESTACARNE = 74
INGESTAAGUA = 474

Comentario#32. BMARPEZ es factor de bioacumulacion de tritio desde del agua de m [Bq/l] (US NRC RG 1.109) = 0,9
Comentario#33. BMARISCO es factor de bioacumulacion de tritio desde del agua de n [Bq/kg /Bq/l] (US NRC RG 1.103) = 0,93

Comentario#34. UPESCA es consumo de pesca (16.5 kg/año) (mayorado a :
Comentario#35. UMARISCO es consumo de marisco (2 kg/año) (mayorado a adulto)
Comentario#36. INGESTAVSH es Ingesta anual de Vegetales Sin Hoja en Dieta MAe
Comentario#37. INGESTALECHE es Ingesta anual de Lecha en Dieta MAed .(148 lit
Comentario#38. INGESTALECHUGAS es Ingesta anual de Vegetales con Hoja en I
Comentario#39. INGESTACARNE es Ingesta anual de carne en Dieta MAed .(74 kg/
Comentario#40. INGESTAAGUA es Ingesta anual de agua de grifo en Dieta MAed .(2

CALCULO DE DOSIS AL HOMBRE

DCF = 6.4 · 10⁻¹¹

OPERACION NORMAL: 1 gr.T en forma HT, 0.1 gr.T en forma HTO al año

DOSIS MARINAS

$$DOSISPESCADO = (AHT + AHTO) \left[\frac{(DCF \cdot UPESCA \cdot BMARPEZ)}{(F \cdot FD)} \right] \frac{1}{1000} \exp(-\lambda \cdot tp)$$

$$DOSISMARISCO = (AHT + AHTO) \left[\frac{(DCF \cdot UMARISCO \cdot BMARMARISCO)}{(F \cdot FD)} \right] \frac{1}{1000} \exp(-\lambda \cdot tp)$$

UCOSTA = 50

$$DOSISEXPOSICIONCOSTA = (AHT + AHTO) \cdot \frac{3600}{1000} \cdot CONTACTDOSISCOSTA \cdot Kc \cdot \frac{\ln(2)}{\lambda} \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot tb)) \cdot \exp(-\lambda \cdot tp)$$

DOSISMARINAS = DOSISPESCADO + DOSISMARISCO + DOSISEXPOSICIONCOSTA

Comentario#41. DCF en SvBq. Valor + penalizante (bebés).
El HT conservativamente como HTO

Comentario#42. tp tiempo para transferir la dosis del pez al hombre en d

DOSISPESCADO = 2.819 × 10⁻⁸

DOSISMARISCO = 3.331 × 10⁻⁹

Comentario#43. UCOSTA: Horas/año de baño en costa de un ser humano (niño)

DOSISEXPOSICIONCOSTA = 1.143 × 10⁻¹³

Comentario#44. Dosis liquidas (solo tritio) (Sv/a) = pescado agua salada + otros alimentos acuatícos + dosis exposición costa

Comentario#45. Totales (Sv/a) = dosis aereas + dosis liquidas (solo tritio)

DOSISMARINAS = 3.172 × 10⁻⁸

DOSIS TERRESTRES

DCFINH = DCF RAA = 22.2

$$DOSISINHALACION = (AHT + AHTO) \cdot \left(\frac{X}{QQ} \right) \cdot RAA \cdot DCFINH \cdot \frac{1}{36400 \cdot 365}$$

$$DOSISCONTACTODEPOSITADAS = SF \left[(AHT + AHTO) \cdot \left(\frac{DD}{QQ} \right) \cdot CONTACTDOSISCOSTA \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot tb)) \right] \cdot \frac{36400}{365}$$

Comentario#46. DOSISINHALACION es la dosis total por inhalacion (Sv/a). Tmamos

Comentario#47. RAA respiracion (m3/d)

Comentario#48. (X/Q) [s/m3]: X (grs/m3) dividido por fuente Q [grs/s]

Comentario#49. (DD/Q) [1/m2]: DD (grs/m2.s) dividido por fuente Q [grs/s]

DOSISINHALACION = 1.76 × 10⁻⁹

DOSISCONTACTODEPOSITADAS = 1.197 × 10⁻¹³

CONCCARNE = 50.629

DOSISINGESTA = DCF · (INGESTAVSH · CONCVSH + INGESTALECHE · CONCLECHE + INGESTALECHUGAS · CONCVSH + INGESTACARNE · CONCCARNE + INGESTAAGUA · CONCAGUA)

DOSISTERRESTRES = DOSISINHALACION + DOSISCONTACTODEPOSITADAS + DOSISINGESTA

DOSIS TOTALES (OPERACION NORMAL)

DOSISTOTALESON = DOSISMARINAS + DOSISTERRESTRES

DOSISINGESTA = 4.095 × 10⁻⁶

DOSISTERRESTRES = 4.097 × 10⁻⁶

DOSISTOTALESON = 4.129 × 10⁻⁶



**OPERACION ACCIDENTAL:
50 gr.T en forma HT, 5 gr.T en forma HTO (por accidente)**

$$\frac{AHT}{QQ} = 50 \cdot QQ \cdot 9600 \cdot 3.7 \cdot 10^{10} \quad \frac{AHTO}{QQ} = 5 \cdot QQ \cdot 9600 \cdot 3.7 \cdot 10^{10}$$

$$QQ = 2.3600 \cdot \frac{QQ}{2.3600 \cdot 365}$$

$$RAA_a = RAA \quad RAAS = 0.001 \quad \chi^A = 1000\chi$$

DOSIS TEMPRANAS

$$DOSIS\ TEMPRANA\ INHALACION = (AHT + AHTO) \left(\frac{\chi^A}{QQ} \right) RAA_a \cdot DCFINH \cdot \frac{1}{86400 \cdot 365}$$

$$DOSIS\ TEMPRANA\ CONTACTO = (AHT + AHTO) \left(\frac{\chi^A}{QQ} \right) RAAS \cdot DCFINH \cdot \frac{1}{86400 \cdot 365}$$

$$DOSIS\ TEMPRANA = DOSIS\ TEMPRANA\ INHALACION + DOSIS\ TEMPRANA\ CONTACTO$$

DOSIS CRONICAS (CEDE)

$$CONCVSH = (AHT + AHTO) \left(\frac{\chi \cdot 10}{QQ} \right) FRACAGUA\ VEG \cdot \frac{ALFA}{HA} \cdot \frac{1}{3.15 \cdot 10^4}$$

$$DOSIS\ TERRENO = SF \left[(AHT + AHTO) \left(\frac{DD \cdot 10}{QQ} \right) CONTACTO \cdot DOSIS\ COSTA \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot tb)) \right] \cdot 86400 \cdot \frac{1}{365}$$

$$DOSIS\ INGESTA = DCF (INGESTAVSH \cdot CONCVSH + INGESTALECHE \cdot CONCLECHE + INGESTALECHUGAS \cdot CONCVSH + INGESTACARNE \cdot CONCCARNE + INGESTAAGUA \cdot CONCAGUA)$$

$$DOSIS\ CRONICA = DOSIS\ TEMPRANA + DOSIS\ INGESTA + DOSIS\ TERRENO$$

Comentario#50. AHT es 50gr de T en forma HT por evento (2 horas)

Comentario#51. AHTO es 5gr de T en forma HTO por evento

Comentario#52. Las dosis accidentales tempranas por inhalacion se calculan con nuevos terminos fuente desde sacrificio del animal a su consumo (20 dias)

Comentario#53. RAAa respiracion 22.2 (m3/d) (adultos) en intervalo de 0-8 horas

Comentario#54. RAAs absorcion de aire en la piel [m3/d] (0.001 valor ad-hoc conservador)

Comentario#55. Ahora χ^A son los valores de χ a las 2 horas de producido el accidente en la frontera del area de exclusion.

$$DOSIS\ TEMPRANA = 0.032$$



Departamento de Energía

$$DOSIS\ CRONICA = 0.058$$