

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Posgrado y Educación Continua

Proyecto Final - Tesis
CCC de Licenciado/a en Tecnología Nuclear



Título:

“Estudio de sensibilidad del impacto radiológico ambiental de las descargas líquidas de la Central Nuclear Atucha en función de la variabilidad de los parámetros del Río Paraná de las Palmas”

Autor:

Carlos Guillermo Carbonell

Director de Tesis:

Licenciado Fabio López

Co – Directora de Tesis:

Licenciada Valeria Amado

Septiembre 2022

Agradecimientos

Quiero brindar mi más sincero agradecimiento a todas estas personas que me han acompañado para lograr realizar este trabajo como, así también, apoyado en todos estos años de estudio. Agradezco, en primera instancia, a la Dra. Daniela Álvarez, que confió en mis posibilidades y, con generosidad, gestionó que este trabajo se pueda realizar en la Autoridad Regulatoria Nuclear; al Lic. Fabio López por su amabilidad, acompañamiento, apoyo y asesoramiento en cada etapa del trabajo realizado: a la Lic. Valeria Amado por brindarme las herramientas necesarias para poder llevar a cabo esta tesis, por orientarme con el modelado y por su amabilidad; a la Lic. Marcela Medici, Ing. Ernesto Callis y Germán Pardo que han considerado los horarios y días que he necesitado para trabajar en la tesis y por el compañerismo y generosidad que tienen para conmigo; a la Bioq, Analía Canoba que, confiando en mis posibilidades, ha dado el aval para que pueda realizar este trabajo en la Autoridad Regulatoria Nuclear; al Dr. Ing. Gerardo Ricciardi, Director del proyecto de Investigación: Modelación hidrológica e hidrodinámica en cuencas, humedales, valles de inundación, cursos de agua y grandes ríos para el uso, control y preservación de los recursos hídricos (Código 80020190300002UR), del Departamento de Hidráulica, EIC, FCEIA, UNR, quien muy amablemente me ha facilitado datos históricos de los parámetros del río Paraná de las Palmas y/o asesorado; al Dr. Pedro Basile, Director del proyecto de investigación: Modelación del transporte de sedimentos y procesos morfodinámicos asociados de erosión-sedimentación en ríos (Código 80020190300073UR), CURIHAM, FCEIA, UNR; al Ing. Oscar Peire, Director de la carrera Licenciatura en Tecnología Nuclear (UNR), que, con mucha generosidad y amabilidad, siempre me ha brindado su apoyo desde el inicio de la carrera, y me ha dado la posibilidad de concretar este sueño; al Ing. Leonardo Bitti, Coordinador de la carrera, que ha sido muy amable conmigo en todo momento y, junto al Ing. Oscar Peire, han sabido ayudar a mis compañeros y mí para sobrellevar cualquier situación, sobre todo dentro del período de pandemia que nos tocó transitar; al Lic. Leonardo Robbio, que me ha ayudado mucho para que pueda cursar la carrera; a todas las autoridades y administrativos de la Universidad Nacional de Rosario, que han contribuido a darle impulso a esta incipiente y promisoriosa carrera para la que estoy orgulloso de realizar el presente trabajo; a las autoridades y administrativos del Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson perteneciente a la Universidad Nacional de San Martín, en el cual es un orgulloso para mí haber alcanzado el título de Técnico Universitario en Aplicaciones Nucleares, que me permitió acceder a la carrera de Licenciatura en la Universidad Nacional de Rosario y la felicidad de haber conocido gente a la que aprecio mucho como el Lic. Adrián Daoud, la

Lic. Carla Notari, la Lic. Ana María Lerner, Natalia Bidart, Valeria Kaplan y Alejandro Dini; a mis compañeros de carrera, tanto de la Licenciatura como de la Tecnicatura, que juntos nos permitimos soñar con concretar algún pequeño logro que contribuya a construir una sociedad mejor; a mi hermana, Mariana, que siempre está al pie del cañón si es necesario; a Noemí Musante, mi madre, y gran apoyo para mí y la familia, por su inconmensurable amor; a Gabriela, mi esposa, que me acompaña con mucho amor, en cada cosa que se me ocurre emprender; a mis hijos, Bauti, Benja, y Guada que aguantaron cada vez que papá tenía que dedicar horas al estudio; por último, quiero dedicarles un especial agradecimiento a mi padre, Carlos Carbonell, a la abuela Ñata y a mi hijito, Rodri, que seguramente estarán esbozando una amorosa sonrisa desde la estrella más brillante del firmamento, muy orgullosos de este logro.

C. G. C.

Índice

RESUMEN	6
1. Introducción	6
2. Objetivos	8
3. Características del Río Paraná de las Palmas.....	8
4. Características de las centrales CNA I y CNA II	10
4.1. Central Nuclear Atucha I	10
4.2. Central Nuclear Atucha II	10
5. Marco teórico	11
5.1. Actividad	11
5.2. Magnitudes dosimétricas	12
5.2.1. Dosis Absorbida.....	12
5.2.2. Tasa de Dosis Absorbida.....	12
5.2.3. Dosis Equivalente	12
5.2.4. Dosis Efectiva.....	13
5.2.5. Magnitudes de dosimetría interna.....	13
5.2.6. Dosis Efectiva Colectiva	14
6. Impacto en el medio ambiente y en el público	14
6.1. Persona Representativa	15
6.2. Valores de referencia de dosis para el público.....	15
6.3. Restricciones operativas de descarga (RO) para una instalación nuclear o radiactiva.....	16
7. Software PC-CREAM 08.....	17
7.1. Modelos de dispersión en río	17
7.1.1. Modelos compartimentales.....	18
7.1.2. Modelo dinámico del PC-CREAM 08.....	20
7.2. Modelo de Evaluación de Dosis	22
7.2.1. Vías de exposición.....	22
7.2.2. Dosis efectiva debido a la ingestión de agua potable	22
7.2.3. Dosis efectiva debido a la ingestión de pescado	23
7.2.4. Dosis efectiva debido a exposición externa a sedimentos.....	24
8. Desarrollo y metodología	25
8.1. Término Fuente	25

8.2.	Región de estudio y parámetros relevantes	25
8.3.	Corrida Base.....	28
8.4.	Análisis de Sensibilidad.....	28
8.6.	Evaluación dosimétrica.....	29
9.	Resultados	29
9.1.	Concentraciones de radionucleidos.....	29
9.1.1.	Resultados obtenidos mediante la <i>Corrida Base</i>	29
9.1.2.	Resultados obtenidos variando el Caudal	30
9.1.3.	Resultados obtenidos variando la profundidad.....	32
9.1.4.	Resultados obtenidos variando el ancho	33
9.1.5.	Resultados obtenidos variando los sólidos en suspensión	35
9.1.6.	Resultados obtenidos variando la densidad de sedimentos del fondo.....	37
9.1.7.	Resultados obtenidos variando la tasa de flujo de sedimentos del fondo.....	39
9.1.8.	Resultados para caudal, ancho y profundidad mínimos	40
9.2.	Estimación dosimétrica.....	41
9.2.1.	Resultados obtenidos para-la <i>Corrida Base</i>	42
9.2.2.	Resultados obtenidos para la mayor y la menor dosis efectiva obtenidas a partir del análisis de sensibilidad	47
9.2.3.	Resultados obtenidos para caudal, ancho y profundidad mínimos	48
10.	Conclusión.....	50
11.	Bibliografía - Referencias	52

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta un estudio de sensibilidad de la concentración y la dosis efectiva anual en la población debida a los radionucleidos presentes en los efluentes líquidos de las centrales nucleares emplazadas en el Sitio Atucha: Central Nuclear Atucha I y Central Nuclear Atucha II, que son descargados al Río Paraná de las Palmas. Para esto se utilizó la información histórica disponible sobre los parámetros del río en las proximidades de la ciudad de Zárate y se aplicó el software PC CREAM 08 a un término fuente del orden de las descargas reales de las centrales. Finalmente, se presenta la estimación de la dosis efectiva anual en la población obtenida a partir de los valores promedios de los parámetros del río; y los valores máximo y mínimo de la dosis surgidos del estudio de sensibilidad.

1. Introducción

Una instalación nuclear descarga, en forma controlada, efluentes radiactivos al ambiente durante su operación normal. La descarga de estos efluentes puede realizarse en forma gaseosa, a la atmósfera, o en forma líquida a un cuerpo de agua superficial. Una vez liberado, el material se dispersa en el medio ambiente llegando a la población. Para evaluar el impacto en la población se calcula la dosis efectiva en la persona representativa, que se define como un grupo representativo de los individuos más expuestos, debido a una instalación en particular.

La dosis efectiva es la magnitud principal en protección radiológica para limitar la aparición de efectos estocásticos. Debido a que no puede ser medida directamente en el cuerpo, es necesario calcularla utilizando modelos matemáticos. Dichos modelos estiman, a partir del material radiactivo descargado y las condiciones dispersivas, la concentración de radionucleidos en las distintas matrices ambientales. Luego, conociendo la ubicación, las características y los hábitos de la persona representativa se calcula la dosis efectiva teniendo en cuenta las distintas vías de exposición a través de las cuales llega el material radiactivo al hombre.

La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) [1] es el organismo argentino dedicado a la regulación de la actividad nuclear en las áreas de seguridad radiológica y nuclear, salvaguardias y no proliferación, y protección y seguridad física.

Su objetivo es *“Proteger a las personas, al ambiente y a las futuras generaciones de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes y mantener*

condiciones satisfactorias de seguridad radiológica y nuclear”, así como “Asegurar que la actividad nuclear se realice únicamente con fines pacíficos y prevenir el acceso no autorizado a materiales nucleares que pudieran provocar situaciones de riesgo”.

Una de las actividades que la ARN realiza para garantizar el cumplimiento del objetivo planteado, es la fiscalización de las descargas de material radiactivo al ambiente de las instalaciones nucleares. Entre éstas se encuentran las centrales nucleares emplazadas en el Sitio Atucha. El mismo se ubica en la ciudad de Lima, a 100 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. En el sitio se encuentran dos reactores de potencia: Central Nuclear Atucha I (CNA I), de 362 MWe de potencia eléctrica bruta y Central Nuclear Atucha II (CNA II), de 745 MWe. Durante su operación normal las centrales realizan descargas gaseosas a la atmósfera, a través de una chimenea, y descargas líquidas al Río Paraná de las Palmas.

La fiscalización de las descargas consiste en la evaluación del cumplimiento de procedimientos operativos para la realización de las descargas al ambiente, de la metodología de muestreo del material a descargar, y la verificación de las determinaciones radioquímicas, el equipamiento utilizado y los cálculos de incertidumbre.

La ARN establece para cada instalación los valores autorizados a descargar tanto por la vía gaseosa como por la líquida, de manera de garantizar el mínimo impacto en la población [2].

Debido a que evaluar el impacto de las descargas de material radiactivo en la población es de fundamental importancia, entendiendo la influencia que los parámetros a considerar tienen en el cálculo de las concentraciones ambientales y en la dosis a la población, y dada la bajante de carácter extraordinario observada en el año 2021 en el Río Paraná de las Palmas, se considera de sumo interés llevar a cabo un estudio de sensibilidad del impacto radiológico ambiental de las descargas líquidas en el Sitio Atucha en función de la variabilidad de los parámetros del río.

Para llevar a cabo el objetivo del proyecto se utiliza el software PC-CREAM 08 [3]. El mismo es aplicable a liberaciones continuas de material radiactivo al ambiente, y permite modelar la transferencia de radionucleidos en las distintas matrices, y la dosis efectiva en la población. Para aplicar este software, se tendrán en cuenta valores hipotéticos representativos de las descargas líquidas del sitio Atucha e información recopilada de diversas fuentes respecto de los parámetros del Río Paraná de las Palmas a la altura de la ciudad de Zárate.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es presentar un análisis de sensibilidad del cálculo de las concentraciones ambientales y dosis efectivas debidas a los radionucleidos presentes en las descargas líquidas de CNA I y CNA II al Río Paraná de las Palmas, considerando el impacto debido a condiciones extremas de los parámetros del río, y evaluar la dosis efectiva en el público.

3. Características del Río Paraná de las Palmas

La traza del canal de navegación del Río Paraná (*Figura 1*) recorre el río Paraná Medio desde el sur de la ciudad de Santa Fe, el Paraná Inferior y el Paraná de las Palmas hasta su desembocadura en el Río de la Plata [4].



Figura 1 – Secciones del Río Paraná [4].

El Río Paraná es un componente de suma importancia en la Cuenca del Plata. Esta cuenca, la segunda cuenca fluvial de América del Sur, comprende una extensa región que abarca desde el Océano Atlántico hasta el altiplano boliviano y la Chapada de Parecés en Brasil, con una superficie aproximada de 3.170.000 km².

El Paraná se encuentra entre los ríos más caudalosos del mundo, con un caudal medio en el año 2005, de alrededor de 18.000 m³/s, alcanzando valores pico, durante las crecidas extraordinarias, que superan los 50.000 m³/s.

La cuenca inferior del río Paraná comprende un área de casi 400.000 km², y recibe como afluentes a los ríos Juramento, Negro Salado, Carcarañá, Arrecifes, Santa Lucía, Corrientes, Feliciano, Nogoyá y Gualeguay.

Los aportes hídricos que recibe este sistema son fundamentalmente de tipo pluvial.

Los suelos son ricos en óxidos de hierro y aluminio. Una proporción de estos materiales es acarreada por procesos erosivos hacia las aguas de los ríos.

Desde la Alta Cuenca del Plata (río Bermejo, Paraguay y Alto Paraná en la región sur del Brasil), las aguas reciben drenaje de tierras sometidas al uso industrial y agrícola (dominando este último uso) y pasan al Paraná Medio e Inferior, recorren las planicies acarreado sedimentos generados en procesos erosivos como los de la cuenca del río Bermejo y los resultantes del manejo deficitario de tierras de cultivo.

Respecto de los aportes de otros cursos, el río Paraguay aporta, en término medio, un 25% del caudal total del Paraná desde la confluencia hacia aguas abajo. El ingreso del caudal del río Paraguay implica cambios significativos en la hidrología con respecto al río Paraná Superior, modificando totalmente el régimen de crecidas aguas abajo de la confluencia donde se inicia el Paraná Medio. El Paraná Medio presenta un amplio valle de inundación que acompaña todo su recorrido desde el sur de la ciudad de Corrientes hasta la formación del Delta.

Este valle se encuentra recorrido por un complejo sistema de lagunas interconectadas por riachos, en el que convergen también algunos afluentes. El sistema regula la velocidad de transmisión de la onda de crecida aguas abajo y es clave en el funcionamiento hidrológico y ecológico del lugar.

El valle de inundación del Paraná funciona como una fuente de captura de sedimentos en situaciones de crecidas; es decir, en los momentos en los que el río desborda sobre los riachos y lagunas, reduce su velocidad y facilita el depósito de importantes cantidades de materiales.

El río Paraná Inferior, tiene un diseño entrelazado, con varias divisiones de flujo. Ello se advierte en la presencia de brazos alternativos y ensanchamientos del cauce. Esta hidrogeomorfología se traduce en una disminución de la velocidad del caudal cuyo resultado es la acumulación de sedimentos. Los sólidos de granulometría más fina se transportan en suspensión hasta el Río de la Plata. El sedimento del fondo reduce su tamaño, en términos generales, acorde con la pendiente del río. Así, en el Paraná Medio los tamaños promedio de partículas oscilan entre 300 y 500 micrones, mientras que para el Paraná Inferior el tamaño medio se reduce a un rango de entre 200 y 250 micrones.

La forma en que son transportados los sedimentos da lugar a que la carga sólida del curso de agua pueda dividirse básicamente en dos partes, la carga de fondo y la carga en suspensión.

Cabe señalar que los procedimientos de vaciado del material dragado modifican localmente las concentraciones de la carga-sólida y en suspensión.

4. Características de las centrales CNA I y CNA II

4.1. Central Nuclear Atucha I

Inició su construcción en junio de 1968 y es considerada la primera central nuclear de potencia de América Latina. Fue conectada al Sistema Eléctrico Nacional el 19 de marzo de 1974 y comenzó su producción comercial el 24 de junio de ese mismo año [5].

Está ubicada sobre el margen derecho del Río Paraná de las Palmas, en la localidad de Lima, Partido de Zárate.

Desde el año 2008, Nucleoeléctrica Argentina S.A. se encuentra ejecutando el Proyecto de Extensión de Vida de Atucha I, cuya finalización permitirá extender su operación por 24 años adicionales a plena potencia.

El reactor es del tipo PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor), de recipiente de presión. Como moderador y refrigerante utiliza agua pesada (D_2O) y la potencia térmica es 1179 MWt. La potencia eléctrica bruta es 362 MWe y emplea como combustible Uranio enriquecido al 0,85%.

4.2. Central Nuclear Atucha II

La piedra fundamental de esta central nuclear se colocó en 1982 y en 1994 se paralizó hasta su reactivación en 2006. Tras la finalización de su construcción en el marco de la reactivación del Plan Nuclear, CNA II alcanzó su primera criticidad el 3 de junio de 2014. Comenzó a entregar energía a la red el 27 de junio de 2014, incorporando la experiencia operativa obtenida por CNA I.

Al igual que CNA I, es un reactor del tipo PHWR de recipiente de presión, pero emplea como combustible Uranio natural. Como moderador y refrigerante utiliza agua pesada (D_2O). Cuenta con una potencia mayor que su predecesora, ya que la potencia térmica es 2175 MWt, y la potencia eléctrica bruta es 745 MWe [6].

5. Marco teórico

El empleo de las primeras fuentes radiactivas en numerosas aplicaciones científicas puso de manifiesto la toxicidad de las radiaciones. Como consecuencia, se planteó la necesidad de conocer los efectos que la radiación induce en un medio dado, en particular, sobre los tejidos de los organismos vivos, y de qué manera protegerlos.

En esta sección se aborda brevemente algunos conceptos relevantes para este trabajo, desde el punto de vista de la dosimetría y la protección radiológica.

5.1. Actividad

Para analizar cuantitativamente el proceso de desintegración radiactiva de un nucleido, se deben tener en cuenta algunas características:

- La desintegración no depende de nada externo, es espontánea.
- El proceso de decaimiento es un proceso probabilístico.

Haciendo una descripción macroscópica se puede plantear que en un instante t se tiene cierta cantidad de núcleos radiactivos $N(t)$, y luego de un tiempo Δt , se va a tener una cantidad $N(t+\Delta t)$.

$$N(t + \Delta t) - N(t) = -\lambda N(t) \cdot \Delta t \quad (1)$$

donde λ se denomina constante de decaimiento, sus unidades son $1/[\text{tiempo}]$ y depende del nucleido.

Trabajando la *Ecuación 1*, haciendo Δt tender a cero, se tiene la expresión de la Actividad:

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (2)$$

La actividad se puede definir como la velocidad de desintegración, es decir, las desintegraciones por unidad de tiempo del radionucleido.

Al resolver esta ecuación diferencial (*Ecuación 2*), considerando que $N(t=0)=N_0$, se obtiene:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

donde N_0 es la cantidad inicial de núcleos radiactivos.

Otro concepto a tener en cuenta es el período de semidesintegración radiactivo que está dado por:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4)$$

La unidad de Actividad es el Bequerel (Bq) que representa las desintegraciones por segundo.

5.2. Magnitudes dosimétricas

5.2.1. Dosis Absorbida

Consiste en la energía media impartida por la radiación ionizante por unidad de masa.

$$D = \frac{dE_{\text{impartida}}}{dm} \quad (5)$$

donde dm es el diferencial de masa y la energía impartida se calcula para cada tipo de radiación.

La unidad que se usa para Dosis Absorbida es el Gray (Gy).

$$\left[\frac{J}{kg} \right] = Gy \quad (6)$$

5.2.2. Tasa de Dosis Absorbida

Se define como la dosis absorbida por unidad de tiempo y su unidad es Gy/s.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad \left[\frac{Gy}{s} \right] \quad (7)$$

5.2.3. Dosis Equivalente

En un tejido T, la dosis equivalente H_T se define como:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{TR} \quad (8)$$

donde w_R es el factor de ponderación de la radiación [8], que depende del tipo y energía de la radiación pero no del tejido irradiado. Este factor es una medida de los efectos producidos por las distintas radiaciones, comparados con los

producidos por los rayos x y gamma para una dosis absorbida dada D_{TR} que es la dosis absorbida promediada sobre el tejido T debida a la radiación R .

Una dosis equivalente de 1 Sv representa la cantidad de dosis de radiación que es equivalente, en términos de daño biológico, a 1 Gy de rayos X o γ . Por lo tanto, la unidad de dosis equivalente es Sievert (Sv) y equivale a:

$$1 \text{ Sv} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad (9)$$

5.2.4. Dosis Efectiva

Cuando la exposición del organismo no es uniforme, para la estimación de los efectos habrá que tener en cuenta la dosis absorbida por los distintos órganos. Para ello se define la Dosis Efectiva:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (10)$$

donde w_T es el factor de ponderación relativo al tejido T [8] y H_T es la dosis equivalente media en órgano o tejido T.

La dosis efectiva es la suma ponderada de las dosis equivalentes medias, recibidas en los distintos órganos o tejidos. Su unidad también es Sievert (Sv), y da cuenta de la dosis en cuerpo entero. La suma de todos los w_T verifica $w_T = 1$.

Es importante indicar, que los w_R y w_T corresponden a bajas dosis y bajas tasas de dosis y se han obtenido a partir de estadísticas sobre individuos de distinto género y diversas edades.

5.2.5. Magnitudes de dosimetría interna

5.2.5.1. Dosis Equivalente comprometida

Es la dosis equivalente en un tejido u órgano desde que se incorpora un radionucleido hasta que decae o se elimina, excretándolo. El período para calcular la dosis comprometida es de 50 años para las incorporaciones en adulto y de 70 años en niños [9]. Se define como:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt \quad (11)$$

La unidad es Sievert (Sv). Es importante indicar que esta definición corresponde al caso de incorporación de una sola fuente o radionucleido.

5.2.5.2. Dosis Efectiva comprometida

Esta dosis tiene en cuenta el tipo de tejido irradiado. Si a la dosis equivalente comprometida $H_T(t)$, en cada tejido u órgano, debida a una dada incorporación de un radionucleido, se multiplica por w_T (factor de ponderación de tejidos) se obtiene la dosis efectiva comprometida.

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(t) \quad (12)$$

Su unidad también es Sievert (Sv).

5.2.6. Dosis Efectiva Colectiva

Expresa una medida de la exposición a la radiación en una población. Se expresa de la siguiente forma:

$$S = \sum_i \bar{E}_i N_i \quad (13)$$

donde N_i es el número de individuos expuestos del grupo i , y \bar{E}_i es la dosis efectiva media del grupo i .

La unidad de dosis efectiva colectiva es Sv. h (Sievert hombre).

6. Impacto en el medio ambiente y en el público

La preocupación de la sociedad por el medio ambiente y la comprensión de que todas las actividades humanas tienen algún efecto en el mismo, ha llevado al desarrollo de procedimientos de análisis de impacto ambiental.

Estos procedimientos son predictivos, es decir, pronostican los probables efectos ambientales antes de alguna acción, como la construcción y operación de una central nuclear. Se basan en la aplicación de modelos que describen las transferencias de radionucleidos en el ambiente, en términos matemáticos, con el fin de producir un resultado que se pueda utilizar en el proceso de toma de decisiones.

6.1. Persona Representativa

La estimación de la dosis efectiva a miembros del público se realiza mediante el concepto de persona representativa definido en ICRP-101 [7].

Para los análisis prospectivos [8], como los que se realizan en la etapa de diseño de una instalación, se recomienda considerar una persona representativa “hipotética” (PRH), la cual es aquella que podría eventualmente recibir las máximas dosis.

Por otro lado, para análisis retrospectivos, como los que se realizan durante la operación normal de una instalación, se recomienda considerar una persona representativa real (PR). La misma se encuentra ubicada a una distancia de la instalación tal que la dosis efectiva estimada sea representativa de los individuos más expuestos. En este caso es conveniente considerar consumos y hábitos más realistas.

La dosis efectiva calculada en la persona representativa se compara con los valores de referencia para público [10], para verificar que la instalación se encuentre operando en forma adecuada.

6.2. Valores de referencia de dosis para el público.

La ARN cuenta con un sistema normativo exhaustivo, siendo la Norma Básica de Seguridad Radiológica AR 10.1.1 [10] aquella donde se establecen los requisitos para la protección de las personas y el ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación. En ella se indican, entre otras cosas, los límites de dosis para el público:

- a) Una dosis efectiva de 1 mSv por año, y en circunstancias especiales, podría aplicarse un valor más elevado de dosis efectiva en un solo año, siempre que el promedio de la dosis efectiva durante cinco años consecutivos no exceda 1 mSv.
- b) Una dosis equivalente en cristalino de 15 mSv por año.
- c) Una dosis equivalente en piel o extremidades de 50 mSv por año.

En cuanto a la limitación de efluentes radiactivos en reactores nucleares de potencia [11], de investigación [12] y en instalaciones radiactivas de Clase I [13], la normativa establece que, en la etapa de diseño, deben optimizarse los sistemas de limitación de las descargas de efluentes radiactivos proveyendo como mínimo suficiente retención de modo que se cumplan las siguientes restricciones de dosis:

- a) La dosis efectiva anual en la persona representativa debida a la liberación de efluentes radiactivos no exceda 0,3 mSv.
- b) La dosis efectiva colectiva debida a la liberación de efluentes radiactivos, no debe exceder 1,5 Sv. h por TBq/año del valor del inventario integrado anual.

En el año 2013, el Directorio de la ARN, estableció la resolución 191/13, en la cual indica que, en el caso de diseño de una instalación en un emplazamiento con múltiples instalaciones, deberá preverse suficiente retención de los efluentes radiactivos tal que no se exceda un valor de dosis anual en el público de 0,5 mSv, considerando las contribuciones de los efluentes radiactivos liberados por todas las instalaciones del emplazamiento [14].

De esta manera, el sitio Atucha, como todas las instalaciones reguladas por la ARN, debe cumplir con las restricciones y límites de dosis en el público.

6.3. Restricciones operativas de descarga (RO) para una instalación nuclear o radiactiva.

Como se mencionó, la ARN lleva a cabo la verificación del control de las descargas de efluentes radiactivos de instalaciones nucleares y radiactivas.

Para esto establece los valores anuales autorizados de descargas, denominados valores de Restricción Operativa (RO), para cada tipo de efluente radiactivo y cada radionucleido significativo.

El criterio adoptado para realizar la selección de aquellos radionucleidos significativos para los que se establecen RO se basa en la evaluación de las siguientes condiciones [15]:

- Contribuir con más del 1% a la dosis efectiva anual en la PR hipotética correspondiente
- Liberar más de 1 TBq por año
- Tener un período de semi-desintegración radiactivo mayor a 10 años
- Indicar el funcionamiento o control de un proceso de la instalación
- Ser relevantes para gestionar la información para la opinión pública

Además, la ARN tiene la facultad de adicionar los radionucleidos que considere necesario.

La ARN verifica el control de las descargas de efluentes radiactivos de instalaciones nucleares y radiactivas, mediante las siguientes actividades [2]:

- El seguimiento de los valores de descarga informados periódicamente por el Operador y la comparación con los valores autorizados de descarga.

- La verificación (in-situ y en laboratorios), de las descargas de los radionucleidos que tienen por licencia valores autorizados de descarga, a partir de muestras de efluentes gaseosos y líquidos.
- La evaluación periódica de los procedimientos vigentes en las instalaciones y del grado de cumplimiento (in-situ) de los mismos, relacionados con la operatoria de medición de descargas.

7. Software PC-CREAM 08

El software PC-CREAM 08 [3] se utiliza para evaluar el impacto radiológico de las descargas rutinarias de material radiactivo al medio ambiente. Fue desarrollado por la Health Protection Agency (HPA), con el auspicio de la Unión Europea (UE), es aplicado ampliamente y fue validado en numerosas intercomparaciones [16] [17] [18]. Los modelos adoptados en este software corresponden a liberaciones continuas y constantes. Consiste en un módulo principal, llamado ASSESSOR, que permite estimar la dosis efectiva; y varios módulos accesorios que calculan la concentración de actividad en las distintas matrices ambientales. En particular, en este trabajo se empleó el módulo de dispersión en río y el módulo principal ASSESSOR. A continuación, se describen brevemente los modelos considerados.

7.1. Modelos de dispersión en río

Los radionucleidos descargados en un río se dispersan principalmente debido a los procesos de advección y difusión. El primero corresponde al transporte del material a lo largo del río, mientras que el segundo contempla la dispersión transversal debida al movimiento molecular. También interviene el proceso de sorción de radionucleidos en los sedimentos. Estos últimos pueden encontrarse suspendidos, en la orilla o en el fondo del río.

La importancia relativa de los procesos que se dan en los ríos depende de la naturaleza del efluente liberado y del cuerpo del agua. Por otro lado, cabe destacar que la interacción con las partículas es compleja. Las propiedades químicas de las partículas en suspensión pueden variar en función del tiempo dependiendo de una variedad de factores físicos (por ejemplo, por resuspensión), procesos químicos y biológicos que ocurren en el agua. Para evaluar el impacto radiológico se debe incluir también la constante de desintegración radiactiva del elemento y tener en cuenta a su progenie.

En el momento de la liberación de radionucleidos en el río, la advección y la dispersión pueden ser los procesos predominantes pero, a largo plazo, los procesos biológicos y químicos tienen mayor relevancia. La elección del modelo depende de la necesidad de la precisión y de la escala de tiempo de las predicciones a realizar.

Dada la complejidad y las características dinámicas de un río, su modelización requiere realizar simplificaciones tanto de los procesos como de su geometría. En general se utilizan tres tipos de modelos, los modelos de dilución simple, los modelos hidráulicos y los modelos semi-empíricos. La ventaja de los modelos semi-empíricos es que permiten conservar la resolución espacial y temporal de los modelos hidráulicos, simplificando otros procesos mediante coeficientes empíricos.

El software PC-CREAM 08 considera dos modelos de dispersión en río, un modelo de dilución simple y un modelo dinámico. El primero supone que se alcanza un equilibrio instantáneo entre el agua y los sedimentos, y es recomendable para realizar evaluaciones preliminares (screening). El modelo dinámico es de tipo semi-empírico, permite realizar evaluaciones más detalladas y dependientes del tiempo requiriendo una mayor cantidad de parámetros de entrada. Este último modelo es el que se utilizó en este trabajo.

7.1.1. Modelos compartimentales

Estos modelos utilizan el análisis compartimental del río de manera de describir la transferencia de actividad entre compartimentos. El análisis compartimental considera una dilución completa, es decir una mezcla uniforme instantánea dentro de cada compartimiento. La ecuación diferencial que describe la variación de la actividad en el compartimento i , A_i , es de la forma:

$$\frac{dA_i}{dt} = \sum_{j=1}^n k_{ji} A_j - \sum_{j=1}^n k_{ij} A_i - k_i A_i + Q_i \quad (14)$$

Para $i = 1, \dots, n$ y donde $k_{ii} = 0$

A_i y A_j son las actividades presentes en el tiempo t , en los compartimentos i y j (Bq)

k_{ji} y k_{ij} son las tasas de transferencia entre los compartimentos i y j (1/s)

k_i es una tasa de transferencia efectiva del compartimento i que tiene en cuenta la pérdida de material del compartimento sin transferencia a otro, por ejemplo, por desintegración radioactiva (1/s)

Q_i es la fuente de entrada continua en el compartimento i , en este caso es la tasa de descarga (Bq/s)

n es número de compartimentos del sistema

La integral temporal considerando todos los radionucleidos en cualquier compartimento viene dada por:

$$A'_i = \int_0^t A_i dt \quad (15)$$

Una cantidad que se utiliza con frecuencia en los modelos compartimentales es el intercambio de volumen R_{ij} [km^3/s], de compartimento i al compartimento j .

$$R_{ij} = k_{ij}V_i \quad (16)$$

donde V_i es el volumen de agua representado por el compartimento i (km^3).

La solución del sistema de Ecuaciones 14 y 15 permite el cálculo de la actividad total (Bq/m^3) presente en cada compartimento, en función del tiempo. Estas concentraciones se utilizan luego para calcular las dosis por incorporación y por exposición externa.

Como se discutió anteriormente, los principales procesos para el movimiento de radionucleidos en un río son advección y dispersión. Sin embargo, para algunos elementos la interacción se da con los sólidos suspensión. En ellos se produce la absorción química y posterior acumulación de elementos radiactivos. Así el agua de río sin filtrar contiene actividad en la matriz sólida y en la fase acuosa. En cambio, el agua de río filtrada sólo contendrá actividad en la fase acuosa. Las concentraciones de radionucleidos en sólidos en suspensión y en agua filtrada dependen de la característica de absorción del radionucleido, esta relación se denomina coeficiente de distribución (K_d).

Cuando el sólido interactúa con los radionucleidos disueltos en agua, la concentración de radionucleidos en la fase acuosa puede disminuir debido a la absorción de radionucleidos en la materia sólida. Por lo tanto, la concentración de radionucleidos en los sólidos en suspensión y en los sedimentos del fondo aumenta.

El coeficiente de distribución de sedimentos K_d se define para un radionucleido dado, como [22]:

$$K_d = \frac{\text{Concentración de radionucleido absorbido por unidad de peso del sedimento } \left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right)}{\text{Concentración de radionucleido disuelto por unidad de volumen de agua } \left(\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right)} \quad (17)$$

El K_d representa la relación entre la concentración de un radionucleido en la matriz sólida y la concentración en el agua, en condiciones de equilibrio (m^3/kg).

La concentración de actividad en el agua sin filtrar, C_{uw} , (Bq/m^3) está dada por [3]:

$$C_{uw} = C_{fw} + C_{ssi} \alpha \quad (18)$$

donde C_{fw} es la concentración de actividad en agua filtrada y α es la carga de sólidos en suspensión (kg/m^3).

La concentración de actividad en agua filtrada C_{fw} es igual a [3]:

$$C_{fw} = \frac{C_{uw}}{1 + K_d \alpha} \quad (19)$$

donde K_d es el factor de distribución agua-sedimento apropiado (m^3/kg).

Finalmente, la concentración de actividad en los sólidos en suspensión C_{ssi} (Bq/kg) es [3]:

$$C_{ssi} = \frac{C_{fw} K_d}{1 + K_d \alpha} \quad (20)$$

7.1.2. Modelo dinámico del PC-CREAM 08

El modelo dinámico del PC CREAM-08 supone que la concentración de radionucleidos en el agua disminuye exponencialmente aguas abajo del punto de liberación debido a la dilución en el agua y a la absorción en los sedimentos. El modelo asume una descarga constante y continua; y una dilución instantánea del efluente en el volumen del río en el punto de descarga.

Para sedimentos, se basa en el modelo de Schaeffer. Este considera un parámetro, el parámetro de Schaeffer k' , que representa la remoción de los radionucleidos de los sedimentos del fondo y el decrecimiento exponencial en el agua. El valor de k' se determina empíricamente, para cada radionucleido en cuestión.

Los parámetros que utiliza PC CREAM 08 para cada radionucleido, constante de desintegración, K_d y k' se pueden consultar en [3].

Como se indicó anteriormente, la aplicación de este modelo requiere la división del río en secciones o compartimentos. La definición de las secciones depende de las características físicas del río, tales como el caudal del agua, la tasa de flujo de los sedimentos del fondo y la cantidad de sólido en suspensión que son considerados constantes en cada sección.

En la *Figura 2* se muestra la estructura del modelo compartimental general, utilizada en el modelo dinámico:

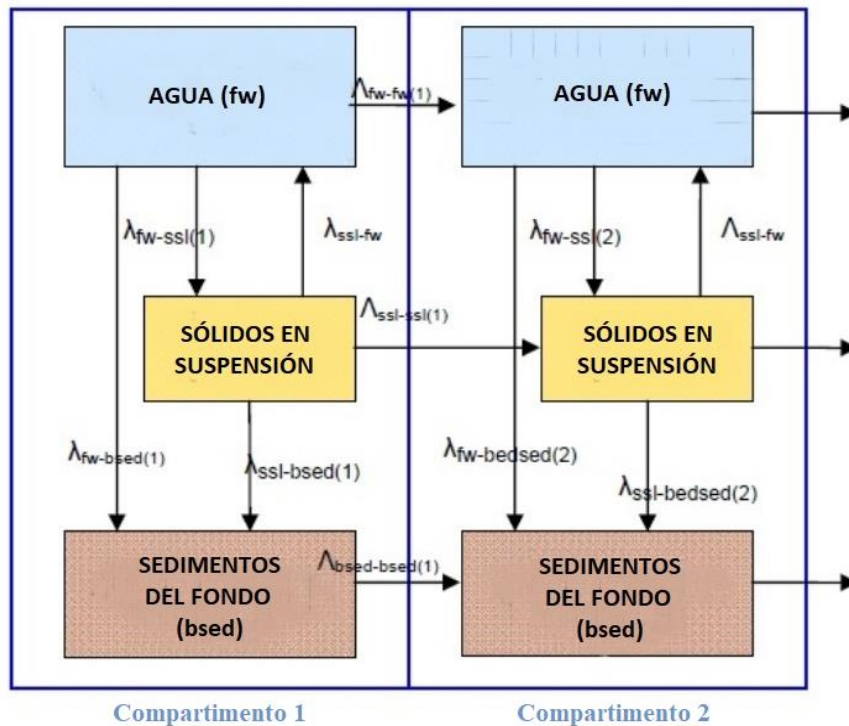


Figura 2 – Modelo compartimental dinámico semi-empírico utilizado en PC-CREAM 08 para ríos. Esquema adaptado de [3].

Como se ve en la Figura 2, el modelo incluye la transferencia de Actividad dentro de cada sección del río entre el agua, los sólidos en suspensión y los sedimentos del fondo. Luego, la transferencia de actividad ocurre corriente abajo a la siguiente sección del río para cada compartimento.

Las tasas de transferencia son las siguientes [3]:

- Transferencia de agua filtrada a sólidos en suspensión:

$$\lambda_{fw-ssl} = K_d \alpha \lambda_{fw-ssl} \quad (21)$$

donde λ_{fw-ssl} = transferencia de actividad del sólido en suspensión al agua filtrada = $3,15 \cdot 10^7$ 1/a

- Transferencia de sólido en suspensión a sedimento del fondo:

$$\lambda_{ssl-bsed} = k' V \quad (22)$$

- Transferencia del agua filtrada a los sedimentos del fondo:

$$\lambda_{fw-bsed} = k' V \quad (23)$$

- Transferencia entre compartimentos de sedimentos del fondo a lo largo de la sección del río (la misma tasa de transferencia se calcula para la carga de sólidos en suspensión):

$$\lambda_{fw-fw} = \frac{V}{l} \quad (24)$$

- Transferencia entre compartimentos de sedimentos del fondo a lo largo de la sección del río:

$$\lambda_{b_{sed}-b_{sed}} = \frac{V_{b_{sed}}}{l} \quad (25)$$

donde $V_{b_{sed}} = 1 \cdot 10^{-4}$ x velocidad del agua del río (V) y los distintos parámetros se definen como:

K_d = Coeficiente de distribución (m^3/kg) [3]

α = Carga de sólidos en suspensión (kg/m^3) (para la sección del río)

k' = Coeficiente de interacción sedimentaria de Schaeffer ($1/m$) [3]

V = velocidad del río (m/a) (para la sección del río)

l = Longitud de la sección del río (m) (para la sección del río)

λ = Constante de desintegración radiactiva ($1/a$)

7.2. Modelo de Evaluación de Dosis

7.2.1. Vías de exposición

Las vías de exposición que permite considerar el módulo ASSESSOR para descargas líquidas a río son: ingestión de agua y pescado, y exposición externa debido a los sedimentos de la orilla.

7.2.2. Dosis efectiva debido a la ingestión de agua potable

El agua del río se puede extraer, tratar y utilizar como agua potable. La concentración de actividad en el agua potable es normalmente menor que la concentración en el agua del río por un factor que varía con los métodos de extracción y tratamiento.

La eficacia en la eliminación de radionucleidos en las plantas de tratamiento depende de la naturaleza de los procesos químicos que intervienen en el tratamiento.

El agua potable puede haber sido filtrada, o filtrada y tratada y se extrae de cualquiera de las secciones aguas abajo del punto de descarga. Las dosis por ingestión de agua potable filtrada, debido a un radionucleido dado, se puede estimar mediante:

$$E_{ing-w} = C_{fw} I_w H_{ing} \quad (26)$$

donde:

E_{ing-w} es la dosis efectiva individual debido a la ingestión de agua potable (Sv/a).

C_{fw} es la concentración de actividad del radionucleido en el agua de río filtrada (Bq/L).

I_w es la tasa de ingestión de agua potable (L/a).

H_{ing} es el factor dosimétrico por ingestión para el radionucleido en cuestión (Sv/Bq).

En el caso en el que el agua potable es filtrada y tratada, se agrega el factor T_{reat} a la ecuación, donde $T_{reat} = 1 - \text{Eficiencia de remoción (R)} / 100$. Los valores para la eficiencia de remoción (R) se pueden consultar en bibliografía [3].

7.2.3. Dosis efectiva debido a la ingestión de pescado

La transferencia de actividad a los peces se calcula utilizando un factor de concentración dependiente del radionucleido. Este factor relaciona la concentración de actividad en el pescado con la concentración en agua filtrada (Bq/kg por Bq/m³). Los factores de concentración en peces, para cada radionucleido, se pueden consultar en [3].

La actividad en peces debida a radionucleidos de vida corta puede estar sobreestimada ya que se supone que la transferencia del agua a los peces es instantánea, en esos casos resulta conveniente utilizar factores de concentración específicos.

La dosis debido a la ingestión de pescado se calcula de la siguiente manera:

$$E_{ing-f} = C_{food} I_w H_{ing} \quad (27)$$

donde:

E_{ing-f} es la dosis efectiva individual debido a la ingestión de pescado (μ Sv/a).

C_{food} es la concentración de actividad en el pescado (Bq/kg).

I_w es la tasa de ingestión de pescado (kg/a).

H_{ing} es el factor dosimétrico por ingestión para el radionucleido en cuestión (Sv/Bq).

donde:

$$C_{food} = C_{fw} CF \quad (28)$$

C_{fw} es la concentración de actividad del radionucleido en el agua filtrada (Bq/m³)

CF es el factor de concentración, dependiente del radionucleido, para el pescado (m^3/kg) [3]

7.2.4. Dosis efectiva debido a exposición externa a sedimentos

La exposición externa de las personas puede ocurrir por inmersión en el agua del río, ya sea durante el baño o la pesca, por permanecer a la orilla del río o en embarcaciones. La cantidad de tiempo que las personas dedican a tales actividades es específica del sitio y debe ser determinado por encuestas de hábitos. Como se mencionó, el PC-CREAM 08 sólo considera la dosis debido a la exposición a sedimentos de la orilla por ser la más significativa. Para radionucleidos emisores *gamma*, la dosis se calcula mediante la expresión [3]:

$$E_{gamma-bs} = C_{bedsed} GAMM DF Conv 0,87 DTW Occ \quad (29)$$

donde:

$E_{gamma-bs}$ es la dosis efectiva debido a irradiación externa por los sedimentos de la orilla ($\mu Sv/a$)

C_{bedsed} es la concentración de actividad en sedimentos (secos) (Bq/kg)

$GAMM$ es la energía gamma (MeV)

DF es la tasa de dosis en sedimentos (húmedo) = 0,288 ($\mu Gy/h$ por Bq/g por MeV)

$Conv$ es la conversión de Bq/kg a Bq/g (0,001)

0,87 tiene unidades de Sv/Gy

DTW es un factor de conversión de concentración de actividad en sedimentos seco a sedimentos húmedo = 0,9

Occ es el tiempo de ocupación de la persona cerca de los sedimentos (h/a)

Para radionucleidos emisores *beta*, la dosis se calcula a partir de:

$$E_{beta-bs} = C_{bsed} Dens t DF wt Occ Conv \quad (30)$$

donde:

$E_{beta-bs}$ Dosis cutánea efectiva ($\mu Sv/a$)

C_{bsed} es la concentración de actividad en sedimentos (secos) (Bq/kg).

$Dens$ es la densidad de los sedimentos = $1500 kg/m^3$.

t = espesor del depósito 0,01m

DF = factor de dosis a piel debido a emisores beta, a 1 m (Sv/a por Bq/m^2)

wt = factor de ponderación para la piel = 0,01

Occ es el tiempo de ocupación de la persona cerca de los sedimentos (h/a) /8760 h/a

$Conv$ = Conversión de Sv/a ($\mu Sv/a$) ($1 \cdot 10^6$)

8. Desarrollo y metodología

8.1. Término Fuente

Este estudio se basa en el análisis del impacto de las descargas de los siguientes radionucleidos: Co-60, Cs-134, Cs-137, H-3, Sb-124, y Zn-65, dado que, en base a la experiencia en la evaluación anual de dosis, éstos radionucleidos tienen una incidencia de más del 1% de la dosis efectiva anual. Para el cálculo de concentraciones y dosis en público se consideran las actividades que se detallan en la *Tabla 1*. Éstas son del mismo orden de magnitud que las descargadas en forma anual por la CNA I y la CNA II.

Valores de descarga típicos [Bq/a]	
Co-60	1 10 ¹⁰
Cs-134	1 10 ⁰⁹
Cs-137	1 10 ¹⁰
H-3	1 10 ¹⁵
Sb-124	1 10 ¹⁰
Zn-65	1 10 ¹⁰

Tabla 1 – Valores de descarga típicos de una instalación como CNA I y CNA II.

8.2. Región de estudio y parámetros relevantes

Para llevar a cabo el estudio propuesto en este trabajo se emplea el modelo de dispersión en río dinámico del PC-CREAM 08. A continuación, se detallan los parámetros del río necesarios para aplicar el modelo seleccionado.

- Caudal
- Ancho
- Profundidad
- Sólidos Suspendidos
- Tasa de flujo de los sedimentos del fondo
- Densidad de los sedimentos del fondo
- Profundidad de los sedimentos del fondo

El punto del Río Paraná de las Palmas que cuenta con más datos históricos de los parámetros es Zárate (Km. 110), entonces se lo define como punto de referencia para el estudio (*Tabla 2*).

Parámetro	Período	Referencias
Ancho y profundidad (m)	2018-2022	[20]
Caudal (m ³ /s)	01/1993 al 10/2021	[21]
Tasa de flujo de sedimentos del fondo (kg/s)	01/1993 al 10/2022	[21]
Sólidos suspendidos (t/m ³)	1996 - 2017	[22] [23]
Densidad de sedimentos del fondo (t/m ³)	1997 - 2017	[22] [23]

Tabla 2 – Periodos y referencias considerados para cada parámetro en la zona de Zárate.

De esta manera, queda definida la región de estudio del Río Paraná de las Palmas en un rango de 27 Km aguas abajo, desde Atucha (aprox. Km. 137) hasta Zárate (Km. 110) (Figura 3).

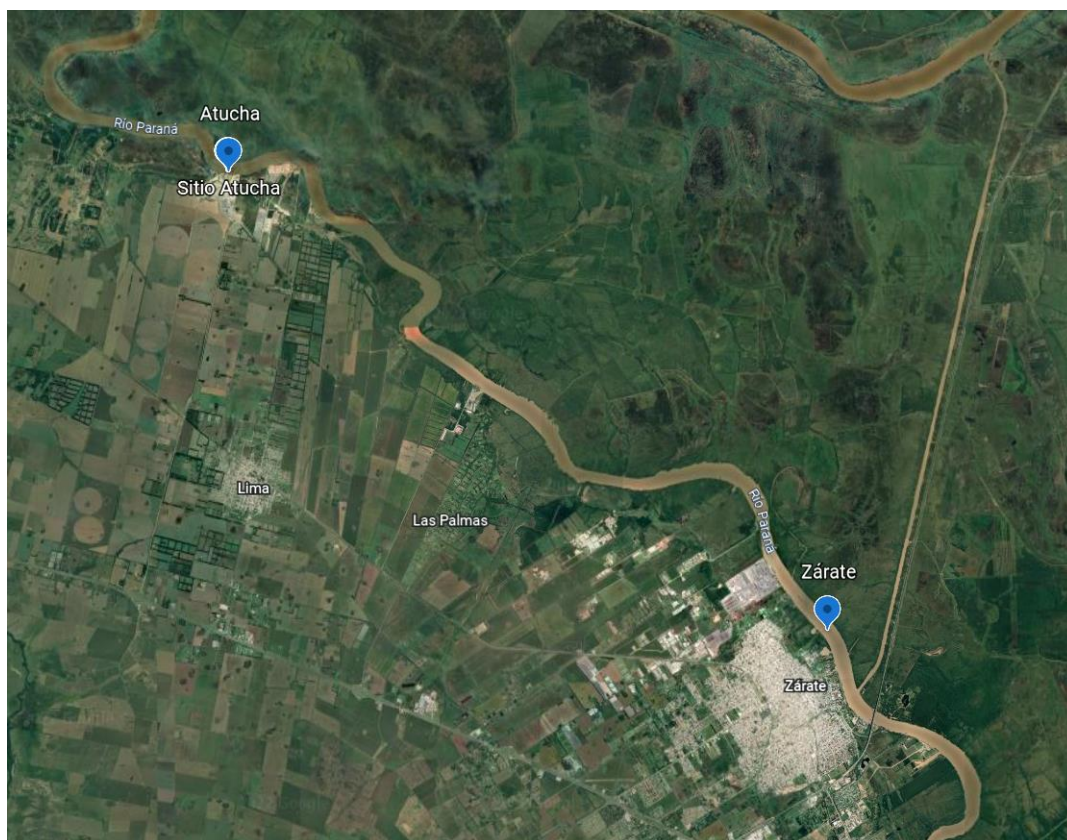


Figura 3 – Imagen satelital que muestra la sección de estudio del Río Paraná de las Palmas. Google Earth, Image: CNES Airbus Maxar Technologies.

Como se describió en la Sección 7.1.2., el modelo dinámico incluye la posibilidad de separar en distintas secciones la totalidad del área de estudio para obtener la concentración en cada una. Sin embargo, los valores de los

parámetros dentro de esta región de 27 km de largo no varían significativamente. Por lo tanto, se resolvió tomar la región como una única sección de estudio y no dividirla en sub-regiones.

Una vez definida el área de interés, se trabajó sobre los datos de los parámetros, recopilados de las referencias mencionadas en la *Tabla 2*, con el objetivo de calcular los valores medios (media aritmética), máximos y mínimos de cada uno. Para esto se empleó la hoja de cálculo Excel de Microsoft.

Los valores medios de los parámetros para los períodos indicados en la *Tabla 2* se muestran en la *Tabla 3*. En la *Tabla 4*, se presentan los máximos calculados para cada uno de los parámetros y el año en el que se alcanzan, mientras que la *Tabla 5* presenta la información para los valores mínimos.

Se observó que en los últimos años el valor promedio del nivel del río en Zárate es la mitad del nivel registrado a la altura de Atucha. Por lo tanto, considerar el nivel de la sección igual al de Zárate resultaría conservativo.

Parámetro	Promedio	Unidades
Caudal	4.441	m ³ /s
Largo	27.000	m
Ancho	181,5	m
Profundidad	11,4	m
Sólidos en suspensión	0,00013	t/m ³
Densidad de sedimentos del fondo	2,28	t/m ³
Tasa de Flujo sedimentos del fondo	42,35	kg/s

Tabla 3 – Valores medios de los parámetros del Río Paraná de las Palmas en la sección de interés, calculados a partir de los datos recopilados.

Parámetro	Máximo	Unidades	Año
Caudal	9.986	m ³ /s	1998
Ancho	260	m	2019
Profundidad	12,5	m	2020
Sólidos en suspensión	0,001	t/m ³	2006
Densidad de sedimentos del fondo	3,4	t/m ³	2016
Tasa de Flujo sedimentos del fondo	595,3	kg/s	1997

Tabla 4 – Valores máximos de los parámetros del Río Paraná de las Palmas en la sección de interés.

Parámetro	Mínimo	Unidades	Año
Caudal	240,1	m ³ /s	2021
Ancho	116	m	2019
Profundidad	10,7	m	2018
Sólidos en suspensión	0,000001	t/m ³	2011
Densidad de sedimentos del fondo	1,1	t/m ³	2017
Tasa de Flujo sedimentos del fondo	0,45	kg/s	2020

Tabla 5 – Valores mínimos de los parámetros del Río Paraná de las Palmas en la sección de interés.

8.3. Corrida Base

Se realizó la *Corrida Base*, considerando las descargas anuales de la *Tabla 1* y los valores medios de los datos recopilados de cada parámetro (*Tabla 3*). La profundidad de los sedimentos del fondo se tomó constante e igual a 0,1 m [24] mientras que el largo de la sección es fijo (27.000 m) e igual a la distancia aproximada desde Atucha a Zárate.

De modo que se han calculado los siguientes resultados de concentración de cada radionucleido en la sección de interés:

- Concentración en agua [Bq/m³]
- Concentración en sólidos en suspensión [Bq/kg]
- Concentración en sedimentos del fondo [Bq/kg]
- Concentración en pescado [Bq/kg]

8.4. Análisis de Sensibilidad

Para estudiar la influencia de cada parámetro de entrada en las concentraciones de radionucleidos resultantes en agua, sólidos en suspensión, sedimentos del fondo y pescado, se realizaron una serie de corridas considerando el término fuente de la *Tabla 1*, la profundidad de los sedimentos del fondo y el largo de la sección iguales a los de la *Corrida Base*.

Se realizó una corrida considerando el valor máximo de cada parámetro de entrada y otra con su valor mínimo, manteniendo los otros parámetros iguales a los considerados en la *Corrida Base*. Esto se realizó para los parámetros: caudal, profundidad, ancho, sólidos en suspensión, densidad de sedimentos del fondo y tasa de flujo de los sedimentos del fondo. Los valores máximos y mínimos de estos parámetros pueden observarse en las *Tablas 4* y *5* respectivamente.

8.5. Concentración para caudal, ancho y profundidad mínimos

Se evalúa la concentración de radionucleidos considerando que el caudal, el ancho y la profundidad del río toman sus valores mínimos simultáneamente, mientras que los demás parámetros mantienen sus valores medios.

8.6. Evaluación dosimétrica

A partir de las concentraciones obtenidas con el modelo de dispersión de río dinámico de PC CREAM, se utilizó el módulo ASSESSOR para calcular los valores anuales de:

- Dosis por irradiación externa debido a radionucleidos emisores beta en sedimentos de la orilla [μSv].
- Dosis por irradiación externa debido a radionucleidos emisores gamma en sedimentos de la orilla [μSv].
- Dosis debido a la ingestión de pescado [μSv].
- Dosis debido a la ingestión de agua [μSv].

Se calculó la dosis efectiva anual total, como la suma de las dosis efectivas para cada vía de exposición, que recibiría una persona adulta del público ubicada en Zárata. Se asume que la persona transcurre 1600 horas al año cerca de los sedimentos de la orilla, con un consumo anual de pescado de 20 kg y una ingesta de agua de 600 L/a [19]. Cabe destacar que la dosis efectiva calculada no corresponde a la que recibiría la persona representativa del Sitio Atucha y, por lo tanto, debería resultar menor a la misma.

Se calculó la dosis efectiva anual para todas las corridas realizadas, tanto para la *Corrida Base* como para las contempladas en el análisis de sensibilidad y para el caso en que se consideraron los valores mínimos de caudal, ancho y profundidad.

9. Resultados

9.1. Concentraciones de radionucleidos

9.1.1. Resultados obtenidos mediante la *Corrida Base*

En la *Tabla 7* se observan los resultados obtenidos para la *Corrida Base*. Como fue expresado, la misma se realizó considerando los valores medios de cada parámetro (*Tabla 3*).

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	6,39 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,95 10 ⁻³	2,94 10 ⁻²	1,46 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	1,59 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,18 10 ⁻²	6,91 10 ⁻²	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	1,23 10 ⁻¹	5,99 10 ⁻²

Tabla 7 – Concentraciones para la Corrida Base.

Al analizar los resultados de la *Tabla 7*, se observa que en lo que respecta a concentración en agua hay una prevalencia del H-3 de casi el 100%; en lo que respecta a la concentración en sólidos en suspensión, existe un 33% de Co-60 y 31% de Cs-137; en cuanto a la concentración en sedimentos del fondo, el 64% es Co-60; y en la concentración en pescado, prevalece el H-3 en 98%.

9.1.2. Resultados obtenidos variando el Caudal

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos para el caso en el que se varió el parámetro caudal teniendo en cuenta el valor máximo (*Tabla 8*) y mínimo (*Tabla 9*).

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	6,94 10 ⁻³	1,39 10 ⁻¹	6,41 10 ⁻¹	2,08 10 ⁻³
Cs-134	1,31 10 ⁻³	1,31 10 ⁻²	1,46 10 ⁻²	2,62 10 ⁻³
Cs-137	1,31 10 ⁻²	1,31 10 ⁻¹	1,59 10 ⁻¹	2,62 10 ⁻²
H-3	3,17 10 ³	9,52 10 ⁻²	0,00 10 ⁰	3,17 10 ⁰
Sb-124	2,83 10 ⁻²	1,41 10 ⁻²	6,93 10 ⁻²	2,83 10 ⁻³
Zn-65	2,66 10 ⁻²	2,66 10 ⁻²	1,23 10 ⁻¹	2,66 10 ⁻²

Tabla 8 – Concentraciones con el caudal máximo del río.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	2,87 10 ⁻¹	5,74 10 ⁰	6,34 10 ⁻¹	8,61 10 ⁻²
Cs-134	5,40 10 ⁻²	5,40 10 ⁻¹	1,44 10 ⁻²	1,08 10 ⁻¹
Cs-137	5,41 10 ⁻¹	5,41 10 ⁰	1,57 10 ⁻¹	1,08 10 ⁰
H-3	1,31 10 ⁵	3,93 10 ⁰	0,00 10 ⁰	1,31 10 ²
Sb-124	1,14 10 ⁰	5,68.10 ⁻¹	6,68 10 ⁻²	1,14 10 ⁻¹
Zn-65	1,09 10 ⁰	1,09 10 ⁰	1,21 10 ⁻¹	1,09 10 ⁰

Tabla 9 – Concentraciones con el caudal mínimo del río.

Al comparar los resultados obtenidos en la *Tabla 8* y *9* con los obtenidos de la *Corrida Base*, se observan las siguientes variaciones:

Relación entre Concentraciones con Caudal Máximo y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	0,44	0,45	1,00	0,44
Cs-134	0,44	0,45	1,00	0,44
Cs-137	0,44	0,45	1,00	0,44
H-3	0,44	0,44	-	0,44
Sb-124	0,45	0,44	1,00	0,45
Zn-65	0,44	0,44	1,00	0,44

Tabla 10 – Relación entre concentraciones considerando el caudal máximo y la *Corrida Base*.

Relación entre Concentraciones con Caudal Mínimo y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	18,40	18,40	0,99	18,40
Cs-134	18,31	18,37	0,99	18,34
Cs-137	18,34	18,40	0,99	18,34
H-3	18,35	18,36	-	18,35
Sb-124	17,95	17,86	0,97	17,95
Zn-65	18,20	18,20	0,98	18,20

Tabla 11 – Relación entre concentraciones considerando el caudal mínimo y la *Corrida Base*.

Al analizar los valores de las *Tabla 10*, se observa que, al considerar el caudal máximo histórico, la concentración de los radionucleidos de interés disminuye a un poco menos de la mitad, aunque para el caso de los sedimentos del fondo se mantiene sin variantes. En lo que respecta a la *Tabla 11*, al variar el caudal por su valor mínimo se advierte un aumento considerable en la concentración de los radionucleidos de interés dado que dichas concentraciones se multiplican aproximadamente por un factor 18, salvo en lo que respecta a sedimentos del fondo donde no se observan variaciones.

9.1.3. Resultados obtenidos variando la profundidad

Las *Tablas 12* y *13* muestran los resultados obtenidos para las concentraciones de radionucleidos al considerar la profundidad del río máxima y mínima respectivamente.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	6,40 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,95 10 ⁻³	2,94 10 ⁻²	1,46 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	1,59 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,17 10 ⁻²	6,92 10 ⁻²	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	1,23 10 ⁻¹	5,99 10 ⁻²

Tabla 12 – Concentraciones con la profundidad máxima del río.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	6,41 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,95 10 ⁻³	2,95 10 ⁻²	1,46 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	1,59 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,18 10 ⁻²	6,93 10 ⁻²	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	1,23 10 ⁻¹	5,99 10 ⁻²

Tabla 13 – Concentraciones con la profundidad mínima del río.

Al comparar los resultados presentados en la *Tabla 12 y 13* con los obtenidos de la *Corrida Base*, se observan las siguientes variaciones:

Relación entre Concentraciones con Profundidad Máxima y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	1,00	1,00
Cs-134	1,00	1,00	1,00	1,00
Cs-137	1,00	1,00	1,00	1,00
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	1,00	1,00
Zn-65	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 14 – Relación entre concentraciones considerando la profundidad máxima y la Corrida Base.

Relación entre Concentraciones con Profundidad Mínima y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	1,00	1,00
Cs-134	1,00	1,00	1,00	1,00
Cs-137	1,00	1,00	1,00	1,00
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	1,00	1,00
Zn-65	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 15 – Relación entre concentraciones considerando la profundidad mínima y la Corrida Base.

En cuanto a los valores de las *Tablas 14 y 15*, no se observan variaciones en la concentración de los radionucleidos respecto de las obtenidas en la *Corrida Base*, tanto para el caso en el que la profundidad es máxima como cuando es mínima.

9.1.4. Resultados obtenidos variando el ancho

En lo que respecta al parámetro ancho del río, se han obtenido los siguientes resultados, al considerar el ancho máximo (*Tabla 16*) y el ancho mínimo (*Tabla 17*).

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	4,93 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,94 10 ⁻³	2,94 10 ⁻²	1,12 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	1,22 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,17 10 ⁻²	5,08 10 ⁻²	6,34 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	9,35 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²

Tabla 16 – Concentraciones con el ancho máximo del río.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	8,44 10 ⁻¹	4,69 10 ⁻³
Cs-134	2,95 10 ⁻³	2,95 10 ⁻²	1,94 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	2,09 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,18 10 ⁻²	9,85 10 ⁻²	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	1,66 10 ⁻¹	5,99 10 ⁻²

Tabla 17 – Concentraciones con el ancho mínimo del río.

Al comparar los resultados obtenidos en la *Tabla 16* y *17* con los de la *Corrida Base*, se observan las siguientes variaciones:

Relación entre Concentraciones con Ancho Máximo y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	0,77	1,00
Cs-134	1,00	1,00	0,77	1,00
Cs-137	1,00	1,00	0,77	1,00
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	0,74	1,00
Zn-65	1,00	1,00	0,76	1,00

Tabla 18 – Relación entre concentraciones considerando el ancho máximo y la *Corrida Base*.

Relación entre Concentraciones con Ancho Mínimo y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	1,32	1,00
Cs-134	1,00	1,00	1,33	1,00
Cs-137	1,00	1,00	1,31	1,00
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	1,43	1,00
Zn-65	1,00	1,00	1,35	1,00

Tabla 19 – Relación entre concentraciones considerando el ancho mínimo y la Corrida Base.

En lo que respecta a los valores reflejados en las *Tablas 18 y 19*, se advierte que no hay variaciones en la concentración de los radionucleidos de interés en agua, sólidos en suspensión y pescado. Sin embargo, para el caso en el que el ancho es máximo las concentraciones en sedimentos del fondo disminuyen en un factor de 0,74 a 0,77 según el radionucleido, y para el caso de ancho mínimo, aumentan aproximadamente un factor que varía de 1,31 a 1,43 según el radionucleido.

9.1.5. Resultados obtenidos variando los sólidos en suspensión

En cuanto a variar el parámetro de sólidos en suspensión por sus valores máximo y mínimo, se han obtenido los siguientes resultados para las concentraciones de los radionucleidos.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	2,68 10 ⁻³	5,35 10 ⁻²	6,41 10 ⁻¹	8,03 10 ⁻⁴
Cs-134	6,16.10 ⁻⁴	6,16 10 ⁻³	1,46 10 ⁻²	1,23 10 ⁻³
Cs-137	6,16 10 ⁻³	6,16 10 ⁻²	1,59 10 ⁻¹	1,23 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	4,51 10 ⁻²	2,25 10 ⁻²	6,92 10 ⁻²	4,51 10 ⁻³
Zn-65	3,39 10 ⁻²	3,38 10 ⁻²	1,23 10 ⁻¹	3,39 10 ⁻²

Tabla 20 – Concentraciones con el valor máximo de sólidos en suspensión.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	5,51 10 ⁻²	1,10 10 ⁰	6,41 10 ⁻¹	1,65 10 ⁻²
Cs-134	6,71 10 ⁻³	6,70 10 ⁻²	1,46 10 ⁻²	1,34 10 ⁻²
Cs-137	6,71 10 ⁻²	6,71 10 ⁻¹	1,59 10 ⁻¹	1,34 10 ⁻¹
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,76 10 ⁻²	3,38 10 ⁻²	6,92 10 ⁻²	6,76 10 ⁻³
Zn-65	6,76 10 ⁻²	3,38 10 ⁻²	1,23 10 ⁻¹	6,76 10 ⁻²

Tabla 21 – Concentraciones con el valor mínimo de sólidos en suspensión.

Al comparar los resultados obtenidos en la *Tabla 20* y *21* con los obtenidos de la *Corrida Base*, se observan las siguientes variaciones:

Relación entre Concentraciones con Sólidos en Suspensión Máximo y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	0,17	0,17	1,00	0,17
Cs-134	0,21	0,21	1,00	0,21
Cs-137	0,21	0,21	1,00	0,21
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	0,71	0,71	1,00	0,71
Zn-65	0,57	0,56	1,00	0,57

Tabla 22 – Relación entre concentraciones considerando sólidos en suspensión máximo y la *Corrida Base*.

Relación entre Concentraciones con Sólidos en Suspensión Mínimo y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	3,53	3,53	1,00	3,53
Cs-134	2,27	2,28	1,00	2,28
Cs-137	2,27	2,28	1,00	2,28
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,06	1,06	1,00	1,06
Zn-65	1,13	0,56	1,00	1,13

Tabla 23 – Relación entre concentraciones considerando sólidos en suspensión mínimo y la *Corrida Base*.

Al evaluar los resultados de las *Tablas 22* y *23*, se observa que, al variar el parámetro sólidos en suspensión, respecto de la *Corrida Base*, no hay cambio

en cuanto a la concentración de los radionucleidos en los sedimentos del fondo. Sin embargo, en cuanto a las otras matrices (agua, pescado y sólidos en suspensión), se advierte que la concentración de cada radionucleido, en general, se comporta de manera distinta. Para H-3 no hay variación en ninguna de las matrices. En cuanto a la condición de sólidos en suspensión mínimo: para Sb-124, Zn-65, se observa un leve aumento de las concentraciones; para Cs-134 y Cs-137, se verifica un poco más del doble de las concentraciones respecto de las de la *Corrida Base* en cada una de estas matrices; y en el caso de Co-60, se observa un factor 3,53 de incremento en las concentraciones en agua, sólidos en suspensión y pescado.

9.1.6. Resultados obtenidos variando la densidad de sedimentos del fondo

Los resultados obtenidos para la concentración de radionucleidos, al considerar el valor máximo y mínimo de la densidad de sedimentos del fondo, se muestran en las siguientes tablas.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	4,79 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,95.10 ⁻³	2,94 10 ⁻²	1,09 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	1,19 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,18 10 ⁻²	4,93 10 ⁻²	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	9,09 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²

Tabla 24 – Concentraciones con el valor máximo de la densidad de sedimentos del fondo.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	9,75 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,95 10 ⁻³	2,94 10 ⁻²	2,25 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	2,41 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,18 10 ⁻²	1,21 10 ⁻¹	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	1,96 10 ⁻¹	5,99 10 ⁻²

Tabla 25 – Concentraciones con el valor mínimo de la densidad de sedimentos del fondo.

Al comparar los resultados obtenidos en las *Tablas 24 y 25* con los obtenidos en la *Corrida Base*, se observan las siguientes variaciones:

Relación entre Concentraciones con la Densidad de Sedimentos del fondo Máxima y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	0,75	1,00
Cs-134	1,00	1,00	0,75	1,00
Cs-137	1,00	1,00	0,75	1,00
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	0,71	1,00
Zn-65	1,00	1,00	0,74	1,00

Tabla 26 - Relación entre las concentraciones considerando la densidad de sedimentos del fondo máxima y la Corrida Base.

Relación entre Concentraciones con la Densidad de Sedimentos del fondo Mínima y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	1,53	1,00
Cs-134	1,00	1,00	1,54	1,00
Cs-137	1,00	1,00	1,52	1,00
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	1,75	1,00
Zn-65	1,00	1,00	1,59	1,00

Tabla 27 - Relación entre las Concentraciones considerando la densidad de sedimentos del fondo mínima y la Corrida Base.

Al analizar los resultados de las *Tablas 26 y 27*, se observa que no hay variación en la concentración de los radionucleidos para las matrices agua, pescado y sólidos en suspensión. Sin embargo, se ve una disminución de aproximadamente un factor 0,75 en la concentración de los sedimentos del fondo, al considerar la densidad de sedimentos máxima, respecto de la *Corrida Base*; y, por el contrario, un incremento en la concentración de los radionucleidos en los sedimentos del fondo en un factor que varía de 1,52 a 1,59 al considerar la mínima densidad de éstos, excepto para Sb-124 que el aumento es en un factor 1,75.

9.1.7. Resultados obtenidos variando la tasa de flujo de sedimentos del fondo

La concentración de radionucleidos, al considerar el valor máximo y mínimo de la tasa de flujo de sedimentos del fondo, se muestran en las *Tablas 28 y 29*.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	1,06 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,95 10 ⁻³	2,94 10 ⁻²	2,51 10 ⁻³	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	2,56 10 ⁻²	5,89 10 ⁻²
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,18 10 ⁻²	2,07 10 ⁻²	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	2,42 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²

Tabla 28 – Concentraciones con el valor máxima de la tasa de flujo de sedimentos del fondo.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	1,56 10 ⁻²	3,12 10 ⁻¹	9,07 10 ⁻¹	4,68 10 ⁻³
Cs-134	2,9510 ⁻³	2,94 10 ⁻²	2,05 10 ⁻²	5,89 10 ⁻³
Cs-137	2,95 10 ⁻²	2,94 10 ⁻¹	2,27 10 ⁻¹	5,89 10 ⁻³
H-3	7,14 10 ³	2,14 10 ⁻¹	0,00 10 ⁰	7,14 10 ⁰
Sb-124	6,35 10 ⁻²	3,18 10 ⁻²	8,33 10 ⁻²	6,35 10 ⁻³
Zn-65	5,99 10 ⁻²	5,99 10 ⁻²	1,66 10 ⁻¹	5,99 10 ⁻²

Tabla 29 – Concentraciones con el valor mínimo de la tasa de flujo de sedimentos del fondo.

La comparación de los resultados mostrados en las *Tablas 28 y 29* con los de la *Corrida Base*, se observan en las siguientes Tablas:

Relación entre Concentraciones con la Tasa de Flujo de sedimentos del fondo máxima y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	0,17	1,00
Cs-134	1,00	1,00	0,17	1,00
Cs-137	1,00	1,00	0,16	1,00
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	0,30	1,00
Zn-65	1,00	1,00	0,20	1,00

Tabla 30 - Relación entre las concentraciones considerando la tasa de flujo de sedimentos del fondo máxima y la Corrida Base.

Relación entre Concentraciones con la Tasa de Flujo de sedimentos del fondo mínima y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	1,00	1,00	1,42	1,00
Cs-134	1,00	1,00	1,40	1,00
Cs-137	1,00	1,00	1,43	0,10
H-3	1,00	1,00	-	1,00
Sb-124	1,00	1,00	1,21	1,00
Zn-65	1,00	1,00	1,35	1,00

Tabla 31 - Relación entre las concentraciones considerando la tasa de flujo de sedimentos del fondo mínima y la Corrida Base.

En los resultados obtenidos al variar la tasa de flujo de sedimentos del fondo, no se observan variaciones en la concentración de radionucleidos en las matrices agua, pescado y sólidos en suspensión. Por el contrario, se ve una disminución en un factor 0,16 a 0,30 (dependiendo del radionucleido) respecto de la *Corrida Base* para el caso en el que la tasa de flujo de sedimentos del fondo es máxima y un aumento en un factor 1,4 (en promedio) en el caso de que dicho parámetro sea mínimo.

9.1.8. Resultados para caudal, ancho y profundidad mínimos

En esta sección se presentan los resultados de la concentración en las distintas matrices considerando en forma simultánea los valores mínimos del caudal, el ancho y la profundidad del río (*Tabla 32*). Estos fueron calculados, como ya fue expresado, a partir de la información recopilada de las referencias mencionadas en la *Tabla 2*. Se asume que los demás parámetros mantienen sus valores medios.

Radionucleidos	Concentración en agua [Bq/m ³]	Concentración en Sólidos en Suspensión [Bq/kg]	Concentración en Sedimentos del fondo [Bq/kg]	Concentración en Pescado [Bq/kg]
Co-60	2,88 10 ⁻¹	5,76 10 ⁰	8,41 10 ⁻¹	8,63 10 ⁻²
Cs-134	5,42 10 ⁻²	5,42 10 ⁻¹	1,93 10 ⁻²	1,08 10 ⁻¹
Cs-137	5,43 10 ⁻¹	5,43 10 ⁰	2,08 10 ⁻¹	1,08 10 ⁰
H-3	1,32 10 ⁵	3,94 10 ⁰	0,00 10 ⁰	1,32 10 ²
Sb-124	1,15 10 ⁰	5,76 10 ⁻¹	9,67 10 ⁻²	1,15 10 ⁻¹
Zn-65	1,10 10 ⁰	1,10 10 ⁰	1,65 10 ⁻¹	1,10 10 ⁰

Tabla 32 – Concentraciones con valores mínimos del caudal, ancho y profundidad del río.

La comparación de los resultados mostrados en la *Tablas 32* con los de la *Corrida Base*, se observan en la siguiente tabla:

Relación entre Concentraciones con Valores Mínimos y la Corrida Base				
Radionucleidos	Agua	Sólidos en Suspensión	Sedimentos del fondo	Pescado
Co-60	18,46	18,46	1,32	18,44
Cs-134	18,37	18,44	1,32	18,34
Cs-137	18,41	18,47	1,31	18,34
H-3	18,49	18,41	-	18,49
Sb-124	18,11	18,11	1,40	18,11
Zn-65	18,36	18,36	1,34	18,36

Tabla 33 - Relación entre las concentraciones considerando valores mínimos del caudal, ancho y profundidad del río y Corrida Base

En la *Tabla 33* se observa que, al considerar los valores mínimos históricos del caudal, el ancho y la profundidad, las concentraciones de los radionucleidos se multiplican por un factor aproximadamente igual a 18. En el mismo sentido, se observa un incremento en las concentraciones en los sedimentos del fondo de un factor promedio de 1,34.

9.2. Estimación dosimétrica

A continuación, se presentan los resultados de las dosis efectivas correspondientes a tres casos:

- Corrida Base
- Dosis mayor y menor obtenidas a partir del análisis de sensibilidad
- Dosis considerando caudal, ancho y profundidad mínimos

9.2.1. Resultados obtenidos para-la *Corrida Base*

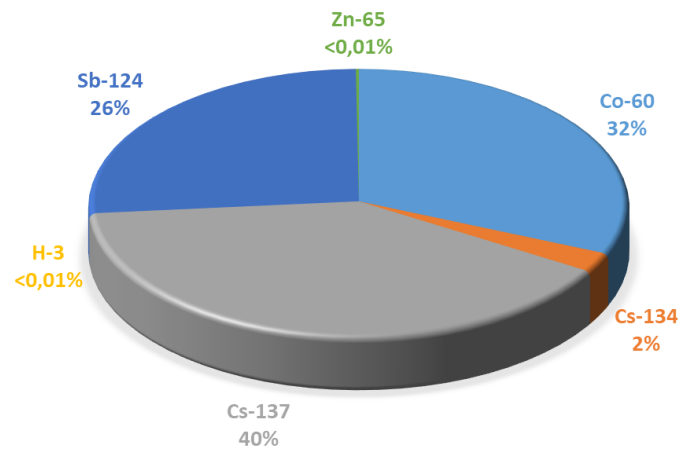
En la siguiente tabla se pueden observar los resultados obtenidos, mediante el módulo ASSESSOR, para la *Corrida Base*:

Radionucleido	Dosis Efectiva [$\mu\text{Sv/a}$] - Vías de Exposición				Dosis Efectiva Total
	Componente Externa		Componente Interna		
	Dosis externa por emisores beta en sedimentos	Dosis externa por emisores gamma en sedimentos	Dosis por ingestión de pescado	Dosis por ingestión de agua	
Co-60	$4,10 \cdot 10^{-4}$	$5,66 \cdot 10^{-1}$	$3,19 \cdot 10^{-4}$	$3,19 \cdot 10^{-5}$	$5,67 \cdot 10^{-1}$
Cs-134	$3,06 \cdot 10^{-5}$	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-2}$
Cs-137	$5,21 \cdot 10^{-4}$	$3,35 \cdot 10^{-2}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$4,96 \cdot 10^{-2}$
H-3	$0,00 \cdot 10^0$	$0,00 \cdot 10^0$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$7,71 \cdot 10^{-2}$	$7,97 \cdot 10^{-2}$
Sb-124	$3,43 \cdot 10^{-4}$	$4,40 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^{-4}$	$9,53 \cdot 10^{-5}$	$4,48 \cdot 10^{-2}$
Zn-65	$2,41 \cdot 10^{-6}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$3,02 \cdot 10^{-2}$
Total	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$6,77 \cdot 10^{-1}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$7,76 \cdot 10^{-2}$	$7,82 \cdot 10^{-1}$
	$6,78 \cdot 10^{-1}$		$1,03 \cdot 10^{-1}$		

Tabla 34 – Dosis efectiva obtenida a partir de las concentraciones de la *Corrida Base*.

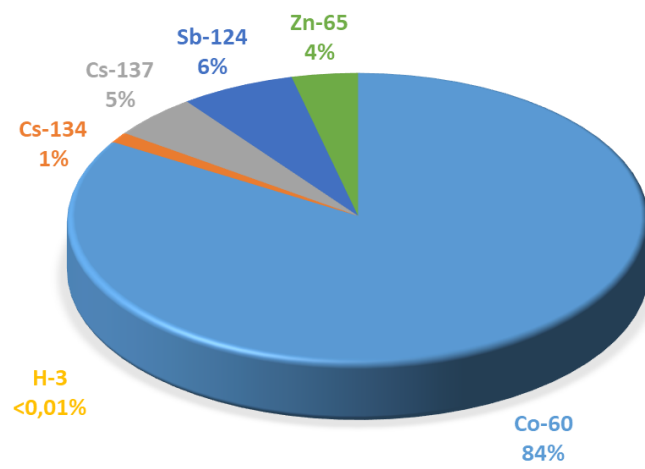
En los siguientes gráficos se muestra la contribución de cada radionucleido a la dosis efectiva anual, para cada vía de exposición, y la contribución de cada una de ellas en dicha dosis.

Dosis externa por emisores beta en sedimentos



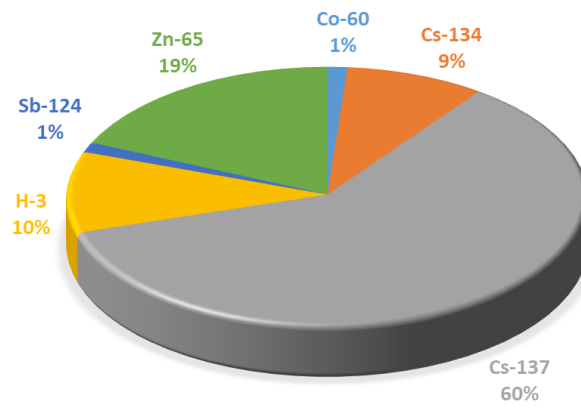
(a)

Dosis externa por emisores gamma en sedimentos



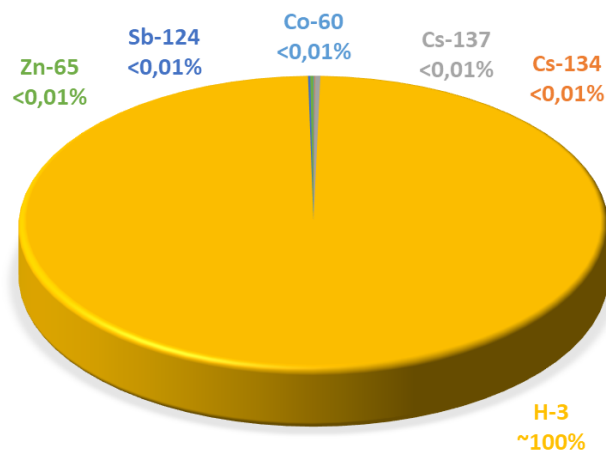
(b)

Dosis por ingestión de pescado



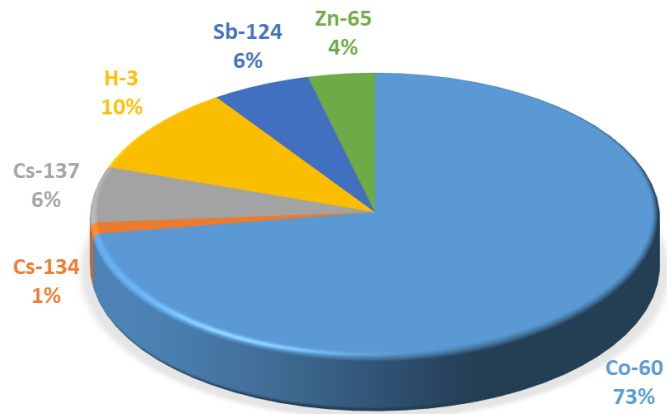
(c)

Dosis por ingestión de agua



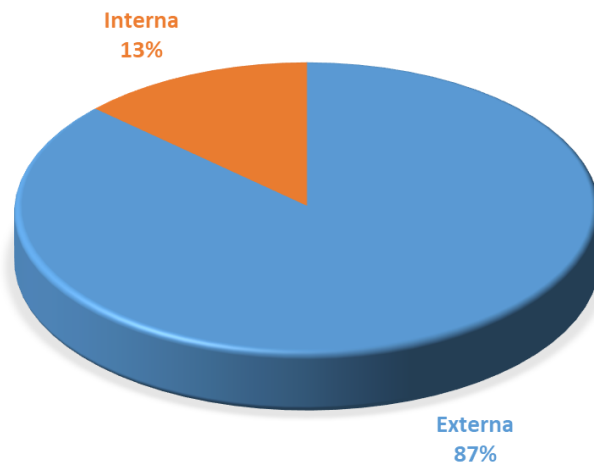
(d)

Dosis Efectiva Anual
Contribución de cada radionucleido

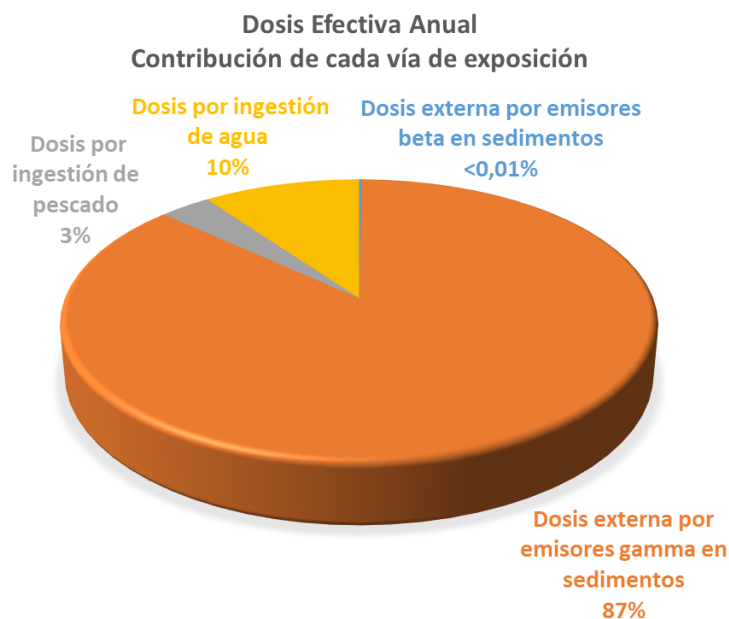


(e)

Dosis Efectiva Anual
Componente Interna y Externa



(f)



(g)

Figura 4 – (a) (b) (c) (d) Contribución de cada radionucleido a la dosis efectiva debido a cada vía de exposición. (e) Contribución de cada radionucleido a la dosis efectiva total. (f) Contribución de la componente externa e interna a la dosis efectiva total. (g) Contribución de cada vía de exposición a la dosis efectiva total.

En la *Figura 4a*, se advierte que hay una incidencia del 40% de Cs-137, 32% de Co-60 y 26% de Sb-124, en la dosis por irradiación externa debido a los emisores beta presentes en los sedimentos del fondo. En cambio, al considerar la dosis por irradiación externa debido a los emisores gamma en sedimentos (*Figura 4b*), se observa que el 80% de la dosis está dada por el Co-60. En lo que respecta a la dosis por ingestión de pescado (*Figura 4c*), el Cs-137 tiene el 60% de incidencia. Por el contrario, en cuanto a la dosis por ingestión de agua (*Figura 4d*) aproximadamente el 100% de la dosis corresponde al H-3.

Al evaluar la dosis efectiva anual total (*Figura 4e y 4f*), se observa que el Co-60 es el radionucleido que más incide, aportando el 73% de la dosis. Debido a esto, la componente externa es la que predomina. Esto último se observa también en la *Figura 4g*, donde se advierte la prevalencia de la dosis gamma por la exposición a los sedimentos.

El valor de la componente líquida de la dosis efectiva anual estimada para el Sitio Atucha, e informada en el Informe Anual de la ARN, correspondiente a las actividades desarrolladas por la institución en el año 2021, es de 1,23 $\mu\text{Sv/a}$ [25]. Como se puede observar, dicho valor resulta mayor a la dosis efectiva anual total calculada en esta simulación.

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación dosimétrica, se puede observar que el valor de dosis efectiva anual estimado se encuentra muy por debajo del límite de dosis anual para público (1 mSv), establecido en la Norma AR 10.1.1 [10]. En el mismo sentido, se puede observar que el valor obtenido también se encuentra muy por debajo de los valores de restricción de dosis, tanto para el sitio Atucha (0,5 mSv/a), como para cada Central Nuclear (0,3 mSv/a) [14].

9.2.2. Resultados obtenidos para la mayor y la menor dosis efectiva obtenidas a partir del análisis de sensibilidad

El mayor valor de dosis efectiva anual se obtuvo en el caso en el que se consideró el mínimo del caudal del río. En la siguiente tabla se pueden observar los resultados obtenidos.

Radionucleido	Dosis Efectiva [$\mu\text{Sv/a}$] - Vías de Exposición				Dosis Efectiva Total
	Componente Externa		Componente Interna		
	Dosis externa por emisores beta en sedimentos	Dosis externa por emisores gamma en sedimentos	Dosis por ingestión de pescado	Dosis por ingestión de agua	
Co-60	$4,07 \cdot 10^{-4}$	$5,61 \cdot 10^{-1}$	$5,86 \cdot 10^{-3}$	$5,86 \cdot 10^{-4}$	$5,68 \cdot 10^{-1}$
Cs-134	$3,03 \cdot 10^{-5}$	$7,92 \cdot 10^{-3}$	$4,10 \cdot 10^{-2}$	$6,16 \cdot 10^{-4}$	$4,96 \cdot 10^{-2}$
Cs-137	$5,16 \cdot 10^{-4}$	$3,31 \cdot 10^{-2}$	$2,81 \cdot 10^{-1}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-1}$
H-3	$0,00 \cdot 10^0$	$0,00 \cdot 10^0$	$4,72 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^0$	$1,47 \cdot 10^0$
Sb-124	$3,32 \cdot 10^{-4}$	$4,26 \cdot 10^{-2}$	$5,68 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-2}$
Zn-65	$2,38 \cdot 10^{-6}$	$2,51 \cdot 10^{-2}$	$8,53 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$
Total	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-1}$	$4,66 \cdot 10^{-1}$	$1,43 \cdot 10^0$	$2,57 \cdot 10^0$
	$6,71 \cdot 10^{-01}$		$1,90 \cdot 10^0$		

Tabla 35 – Dosis máxima obtenida, que corresponde al caudal mínimo del río.

La Tabla 35 muestra los resultados de dosis efectiva al considerar el mínimo del caudal del río. Dicha dosis efectiva es $2,57 \mu\text{Sv/a}$ y constituye la máxima dosis de todas las obtenidas en el estudio de sensibilidad.

El valor mínimo de la dosis efectiva anual fue de 0,22 $\mu\text{Sv/a}$ y se registró al considerar la Tasa de flujo de sedimentos del fondo máxima. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Radionucleido	Dosis Efectiva [$\mu\text{Sv/a}$] - Vías de Exposición				
	Componente Externa		Componente Interna		Dosis Efectiva Total
	Dosis externa por emisores beta en sedimentos	Dosis externa por emisores gamma en sedimentos	Dosis por ingestión de pescado	Dosis por ingestión de agua	
Co-60	$6,77 \cdot 10^{-5}$	$9,34 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^{-4}$	$3,19 \cdot 10^{-5}$	$9,38 \cdot 10^{-2}$
Cs-134	$5,28 \cdot 10^{-6}$	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-5}$	$3,66 \cdot 10^{-3}$
Cs-137	$8,40 \cdot 10^{-5}$	$5,39 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-2}$
H-3	$0,00 \cdot 10^0$	$0,00 \cdot 10^0$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$7,71 \cdot 10^{-2}$	$7,97 \cdot 10^{-2}$
Sb-124	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^{-4}$	$9,53 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$
Zn-65	$4,75 \cdot 10^{-7}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$9,81 \cdot 10^{-3}$
Total	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$7,76 \cdot 10^{-2}$	$2,22 \cdot 10^{-1}$
	$1,19 \cdot 10^{-1}$		$1,03 \cdot 10^{-1}$		

Tabla 36 – Dosis mínima obtenida, que corresponde a la máxima Tasa de flujo de sedimentos del fondo.

Nuevamente, la dosis efectiva anual máxima se encuentra muy por debajo de los valores de referencia para público [10] [14].

9.2.3. Resultados obtenidos para caudal, ancho y profundidad mínimos

La *Tabla 37* muestra los resultados de la dosis efectiva al considerar los valores mínimos del caudal, ancho y profundidad del río, calculados como fue mencionado en la sección anterior. Dicha dosis efectiva es 2,8 $\mu\text{Sv/a}$ y resulta levemente superior a la obtenida al considerar el caudal mínimo en el análisis de sensibilidad (*Tabla 35*).

Radionucleido	Dosis Efectiva [$\mu\text{Sv/a}$] - Vías de Exposición				
	Componente Externa		Componente Interna		Dosis Efectiva Total
	Dosis externa por beta en sedimentos	Dosis externa por gamma en sedimentos	Dosis por ingestión de pescado	Dosis por ingestión de agua	
Co-60	$5,39 \cdot 10^{-4}$	$7,44 \cdot 10^{-1}$	$5,87 \cdot 10^{-3}$	$5,87 \cdot 10^{-4}$	$7,51 \cdot 10^{-1}$
Cs-134	$4,05 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$	$6,18 \cdot 10^{-4}$	$5,25 \cdot 10^{-2}$
Cs-137	$6,82 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-2}$	$2,82 \cdot 10^{-1}$	$4,23 \cdot 10^{-3}$	$3,31 \cdot 10^{-1}$
H-3	$0,00 \cdot 10^0$	$0,00 \cdot 10^0$	$4,73 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^0$	$1,47 \cdot 10^0$
Sb-124	$4,79 \cdot 10^{-4}$	$6,15 \cdot 10^{-2}$	$5,76 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$6,95 \cdot 10^{-2}$
Zn-65	$3,24 \cdot 10^{-6}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$8,58 \cdot 10^{-2}$	$2,57 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-1}$
Total	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$8,94 \cdot 10^{-1}$	$4,68 \cdot 10^{-1}$	$1,43 \cdot 10^0$	$2,8 \cdot 10^0$
	$9,0 \cdot 10^{-1}$		$1,9 \cdot 10^0$		

Tabla 37 – Dosis efectiva obtenida para caudal, ancho y profundidad mínimos.

10. Conclusión

En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio de sensibilidad de la concentración y la dosis efectiva anual en la población debida a los radionucleidos relevantes (Co-60, Cs-134, Cs-137, H-3, Sb-124, y Zn-65) presentes en las descargas líquidas de CNA I y CNA II al Río Paraná de las Palmas. Para esto se utilizó la información disponible sobre los parámetros del río en las proximidades de la ciudad de Zárate y se aplicó el software PC CREAM 08 a un término fuente del orden de las descargas reales de las centrales. Se realizaron una serie de evaluaciones en las que se calculó la concentración de radionucleidos en agua, en sólidos en suspensión, en sedimentos del fondo y en pescado; y la dosis efectiva en la población, tanto para los valores medios de los parámetros del río como para sus niveles máximos y mínimos.

El estudio de sensibilidad realizado resultó una herramienta sumamente útil para analizar y cuantificar los efectos provocados por fenómenos climáticos extremos, como la sequía que se ha registrado en estos últimos años en la cuenca del río Paraná, en la concentración de radionucleidos en las distintas matrices y en la dosis en la población. Este tipo de estudios cobra especial relevancia en el contexto del cambio climático global, caracterizado por un aumento en la frecuencia y en la intensidad de tales fenómenos.

Adicionalmente se calculó la concentración, en las distintas matrices, y la dosis en la población para una situación extrema en la que el caudal, el ancho y la profundidad del río toman simultáneamente sus valores mínimos.

A partir del análisis de sensibilidad se observó que el parámetro del río más relevante, tanto para el cálculo de las concentraciones como para el de la dosis en la población, es el caudal y, en segundo lugar, la cantidad de sólidos en suspensión. En ambos casos, las mayores concentraciones y dosis se obtuvieron para los valores mínimos de estos parámetros siendo las matrices más afectadas: agua, sólidos en suspensión y pescado.

La dosis efectiva anual en la población, estimada considerando los valores promedio de los parámetros, es de 0,78 μSv . Este valor se incrementa en un factor de 3,29 al considerar el valor mínimo del caudal del río, es decir asciende a 2,57 $\mu\text{Sv/a}$, la máxima dosis obtenida del análisis de sensibilidad. No se encontraron diferencias significativas respecto del valor de dosis estimado a partir de los valores mínimos simultáneos de los parámetros caudal, ancho y profundidad.

El valor de la dosis efectiva anual en la que potencialmente incurriría una persona adulta del público ubicada en Zárate, estimada a partir de los valores medios de los parámetros del río, resultó menor al valor de la componente líquida de la dosis efectiva anual en la persona representativa del Informe

Anual de la ARN del año 2021. Esto era de esperar, teniendo en cuenta la definición de persona representativa.

En todos los casos analizados, tanto en el estudio de sensibilidad como en el caso extremo asociado a los valores mínimos de caudal, ancho y profundidad; las dosis estimadas están muy por debajo del límite de dosis efectiva anual para público (1mSv), establecido por la Norma AR 10.1.1, y de los valores de restricción de dosis establecidos para el sitio Atucha (0,5 mSv/a) y para cada central (0,3 mSv/a).

11. Bibliografía - Referencias

- [1] Autoridad Regulatoria Nuclear. (2021). Recuperado de página oficial: <https://www.argentina.gob.ar/arn>
- [2] Álvarez, D. E., Czerniczyniec, M.A. Amado, V.A., Curti, A.R., y Lee Gonzáles, H.M. (2015). Verificación del control de las descargas de efluentes radiactivos al ambiente. Buenos Aires. Autoridad Regulatoria Nuclear.
- [3] Smith, J. and Simmonds, J. (2009) The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM08. Health Protection Agency – Center for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Radiation Protection Division
- [4] Hidrovía S. A. (2006). Estudio de impacto ambiental de las operaciones de profundización de la vía navegable Santa Fe – Océano a 36/28 pies. HDRV/107/2006. Buenos Aires, Argentina.
- [5] Nucleoeléctrica Argentina S. A. (2022) Recuperado de página oficial: <https://www.na-sa.com.ar/es/centrales-nucleares/atucha-1>
- [6] Nucleoeléctrica Argentina S. A. (2022) Recuperado de página oficial: <https://www.na-sa.com.ar/es/centrales-nucleares/atucha-2>
- [7] ICRP 101. (2006). Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public. Polestar Wheatons Ltd, Exeter, UK
- [8] ICRP 103. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Polestar Wheatons Ltd, Exeter, UK
- [9] IAEA, 2014. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. General safety requirements (GSR), Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [10] Autoridad Regulatoria Nuclear. Norma AR 10.1.1. Norma básica de Seguridad Radiológica, Revisión 4. Buenos Aires, Argentina.
- [11] Autoridad Regulatoria Nuclear. Norma AR 3.1.2. Limitación de efluentes radiactivos en reactores nucleares de potencia. Buenos Aires, Argentina.
- [12] Autoridad Regulatoria Nuclear. Norma AR 4.1.2. Limitación de efluentes radiactivos en reactores nucleares de investigación. Buenos Aires, Argentina.
- [13] Autoridad Regulatoria Nuclear. Norma AR 6.1.2. Limitación de efluentes radiactivos en instalaciones radiactivas Clase I. Buenos Aires, Argentina.
- [14] Autoridad Regulatoria Nuclear (2013). Resolución 191/13. Directorio de Autoridad Regulatoria Nuclear, 3 de junio de 2013, Buenos Aires, Argentina.

- [15] Hill, M, Kerrigan, E. (2005). Developing guidance for setting limits on radioactive discharges to the environment from nuclear licensed sites. Science Report: SC010034/SR. Environment Agency. Almondsbury, Bristol.
- [16] IAEA, 2012. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) — A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003-2007), IAEA-TECDOC-1678, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [17] Stocki, T., Tellería, D., Bergman, L., Proehl, G., Amado, V., Bonchuk, I., Boyer, P., Chyly, P., Curti, A., Heling, R., Kliaus, V., Krajewski, P., Latouche, G, Lauria, D., Mourlon, C., Newsome, L., Sági, L., Smith, J., 2011. Reference methodologies for radioactive controlled discharges an activity within the IAEA's programme environmental modelling for radiation safety II (EMRAS II), Radioprotection 46 6 S687-S693. doi: 10.1051/radiopro/20116743s.
- [18] IAEA, 2017. Performance of Models in Radiological Impact Assessment for Normal Operation, IAEA-TECDOC-1808, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [19] IAEA, 2001. Safety reports series N° 19, Generics Models for use in Assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [20] Boletín Fluvial de la Subsecretaría de puertos, vías navegables y marina mercante. Dirección Nacional de Control de Puertos y Vías Navegables. Período 2018-2022. Zárate.
- [21] Sistema Nacional de Información Hídrica. Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica. Período: 01/1993 – 10/2021. Datos históricos, Estación 4001, Paraná de las Palmas, Zárate.
- [22] Modelación hidrológica e hidrodinámica en cuencas, humedales, valles de inundación, cursos de agua y grandes ríos para el uso, control y preservación de los recursos hídricos (Código 80020190300002UR), Departamento de Hidráulica, EIC, FCEIA, UNR.
- [23] Modelación del transporte de sedimentos y procesos morfodinámicos asociados de erosión-sedimentación en ríos (Código 800201903000073UR), CURIHAM, FCEIA, UNR
- [24] Eman AlQasimi, Tew-Fik Mahdi (2020). A new one-dimensional numerical model for unsteady hydraulics of sediments in rivers, SN Applied Sciences. Springer Nature, Swizaerland
- [25] Autoridad Regulatoria Nuclear, 2021. Informe Anual. Buenos Aires, Argentina.