

Evaluación de las Consecuencias Radiológicas en una Emergencia Nuclear en Argentina

Kunst, J.¹, Rodriguez, M.¹, Sadañiowski, I.¹

¹Autoridad Regulatoria Nuclear, Av. del Libertador 8250, C.P. 1429, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

El Centro Control de Emergencias (CCE) de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) utiliza diversas herramientas para estimar la dispersión de contaminantes radiactivos y determinar las consecuencias radiológicas en los alrededores durante una emergencia nuclear.

El objetivo principal de este trabajo es describir las herramientas utilizadas para realizar evaluaciones en un accidente nuclear e intentar, si fuera necesario, una estimación inversa del término fuente. Además, se describen la obtención de los parámetros meteorológicos, los resultados de los modelos y su utilidad para la toma de decisiones.

Para la estimación de los contaminantes radioactivos dispersos en la atmósfera, el CCE utiliza el código SEDA, desarrollado por la ARN, que permite obtener las líneas de isodosis e isoconcentración a una escala local (20 km), y el International Exchange Program (IXP), desarrollado por el National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC), para la escala regional. Por otro lado, para la dispersión a escala global, a través del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN) se obtiene la asistencia de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), quien transmite el pedido para correr los modelos a los Centros Regionales Meteorológicos Especializados (RSMC). Una ventaja importante es que los resultados de los modelos pueden ser integrados al Sistema de Información Geográfica que posee la ARN permitiendo realizar cruces de información y de esta manera plasmar posibles escenarios de acción para actuar antes, durante y en la etapa de post emergencia.

Palabras claves: emergencias nucleares - dispersión atmosférica – evaluación de consecuencias radiológicas

1. INTRODUCCIÓN

La República Argentina posee tres reactores nucleares en funcionamiento, la Central Nuclear Atucha – Unidades I y II, en la localidad de Lima, provincia de Buenos Aires; y la Central Nuclear Embalse, en la localidad de Embalse Río Tercero, provincia de Córdoba. Las dos centrales nucleares son operadas por la empresa Nucleoeléctrica Argentina SA (NA-SA).

La Autoridad Competente en cuanto a la regulación y fiscalización en materia nuclear es la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), según la Ley N° 24.804 (Ley Nacional de la Actividad Nuclear) y su Decreto Reglamentario N° 1.390. Este decreto también establece las funciones de la ARN relacionadas a la preparación, capacitación y respuesta en cuanto a emergencias nucleares y radiológicas (ARN, 2012).

La ARN es responsable de la respuesta en el exterior de la Central y la encargada de dirigir las Organizaciones de Respuesta en caso de emergencia nuclear (ARN, 2012). Por ello, es de suma importancia poseer las herramientas y conocimientos necesarios para evaluar la dispersión atmosférica del material radioactivo liberado y sus posibles consecuencias en la población y los alimentos.

En caso de emergencia radiológica y/o nuclear el Centro Control de Emergencias (CCE) de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) utiliza modelos de cálculo para estimar la dispersión de contaminantes radiactivos y evaluar las consecuencias radiológicas en los alrededores. Estos modelos requieren información relevante tales como características de la fuente de emisión, del material que podría emitirse y de las condiciones meteorológicas en el lugar de la emergencia. Este tema es de vital importancia en el momento de la toma de decisiones durante una emergencia; los resultados de las evaluaciones realizadas en este tema serán también complementados con los resultados del monitoreo ambiental en la zona de emergencia.

Si bien la probabilidad de ocurrencia de un accidente nuclear es muy baja, debido a las medidas de seguridad tomadas, no es imposible que esto ocurra y sus consecuencias son potencialmente significativas, por lo cual es necesario prepararse para la respuesta ante una eventual emergencia nuclear. Las consecuencias pueden resultar moderadas o leves si se aplican correctamente medidas de protección específicas.

2. DISPERSIÓN ATMOSFERICA Y EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS

Los modelos de dispersión atmosférica son básicamente representaciones de la capa límite de la atmósfera, que acoplada con información del accidente radiológico o nuclear (término fuente, tipo de accidente, duración de la emisión, condiciones topográficas, etc.) pueden brindar la capacidad de predecir las consecuencias radiológicas durante la respuesta a emergencias.

Los efluentes liberados por la instalación en caso de emergencia (también en operación normal) se dispersan en la atmósfera debido a fenómenos de transporte de masa y a los movimientos producidos en ésta. La dispersión atmosférica produce un patrón de distribuciones espaciales de la concentración de radionucleidos en la atmósfera, cuyos valores máximos se encuentran cerca de la fuente y van disminuyendo hasta valores varios órdenes menores al alejarse de ella.

La concentración de un contaminante depende, entre otras cosas de:

- La fuente (forma, cantidad y calidad de la emisión)¹;
- El decaimiento radiactivo del radionucleido;
- Variables climáticas y topográficas que afecten su transporte y dispersión;
- Su retención por la interacción con la superficie de sólidos y/o cuerpos de agua (depósito seco), así como la interacción con gotas de lluvia, niebla o nubes (depósito húmedo);

¹ Desde el punto de vista de las consecuencias radiológicas en la población, el parámetro técnico más importante es el llamado término fuente definido como: la composición de la liberación, la actividad de cada uno de los nucleídos liberados, el momento en que comienza la liberación, la duración y la altura de la emisión potencial o real, siendo esta última determinada por la presión y temperatura de la emisión.

- Su interacción con seres vivos (vegetales, animales).

Los modelos de cálculo intentan representar de la mejor forma posible, como influyen todos estos factores en la dispersión del contaminante. Estos incluyen modelos de transferencia de radionucleidos, a través de las distintas vías de irradiación:

- Inhalación: Irradiación interna por respirar dentro de la nube;
- Inmersión en la nube: Irradiación externa durante el pasaje de la nube radiactiva. Se integra al tiempo de pasaje de la nube;
- Irradiación externa: Irradiación debida a los aerosoles depositados sobre el terreno.

Es importante destacar que es posible evaluar el término fuente utilizando una estimación inversa basada en datos del monitoreo ambiental. Este método fue aplicado por el grupo de evaluación del CCE para estimar el término fuente en simulacros internacionales, basados en datos de tasa de dosis y depósito superficial provistos como información durante el ejercicio; asimismo fue utilizado por las autoridades japonesas durante el accidente de Fukushima (The National Diet of Japan, 2012).

3. MODELOS UTILIZADOS

En esta sección se describirán los datos de entrada necesarios para la utilización de los modelos y los métodos de obtención de dichos datos, los modelos de cálculo utilizados, y la descripción de los productos obtenidos.

3.1. Datos de entrada

Los datos de entrada necesarios para ejecutar los modelos podrían definirse en dos grupos:

- Datos Meteorológicos

Para correr los modelos de cálculo son necesarios varios datos meteorológicos entre ellos velocidad y dirección del viento, la existencia o no de precipitaciones y la clase de estabilidad atmosférica.

La estabilidad es el grado con que la atmósfera genera o suprime los movimientos turbulentos y puede clasificarse según las categorías de Pasquill (Turner, B. 1970). La clase de estabilidad no es un parámetro medible directamente por un sensor, sino que debe estimarse indirectamente a partir de otros datos meteorológicos. Existen numerosos métodos para calcular la clase de estabilidad, pero en el CCE se trabaja particularmente con dos métodos, que se describen a continuación:

- Primer método:

La Regulatory Guide de la U.S. Nuclear Regulatory Commission (US-NRC, 2007), utiliza una clasificación basada sólo en el gradiente térmico para determinar la clase de estabilidad, tanto de día como de noche.

Este método se basa en la clasificación del gradiente de temperatura ($\Delta T/\Delta H$), en base a la siguiente tabla:

Tabla N°1

P-G Class	(DEGREE C/100M)
A	$DT \leq -1.9$
B	$-1.9 < DT \leq -1.7$
C	$-1.7 < DT \leq -1.5$
D	$-1.5 < DT \leq -0.5$
E	$-0.5 < DT \leq 1.5$
F	$1.5 < DT \leq 4.0$
G	$4.0 < DT$

Fuente: Regulatory Guide 1.23 (US-NRC, 2007)

- Segundo método:

La guía 454/R-99-0052 de la Environmental Protection Agency (EPA) describe diferentes métodos para calcular la clase de estabilidad atmosférica, uno de ellos, el SRDT method (solar radiation/delta-T) utiliza:

- Durante el día: velocidad del viento y radiación solar; y,
- Durante la noche: gradiente de temperatura en función de la altura y velocidad del viento.

Debido a que durante la noche no hay radiación solar, se presenta la alternativa de reemplazarla por el gradiente de temperatura durante la noche.

Tabla N°2

**Key to Solar Radiation Delta-T (SRDT) Method for Estimating
Pasquill-Gifford (P-G) Stability Categories**

DAYTIME				
Wind Speed (m/s)	Solar Radiation (W/m ²)			
	≥ 925	925 - 675	675 - 175	< 175
< 2	A	A	B	D
2 - 3	A	B	C	D
3 - 5	B	B	C	D
5 - 6	C	C	D	D
≥ 6	C	D	D	D

NIGHTTIME		
Wind Speed (m/s)	Vertical Temperature Gradient	
	< 0	≥ 0
< 2.0	E	F
2.0 - 2.5	D	E
≥ 2.5	D	D

Fuente: Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications, EPA (2000).

² Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications, EPA-454/R-99-005, United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality, Planning and Standards, February 2000.

- Otros métodos:

Existe también otra metodología más antigua, el esquema original desarrollado por Pasquill (Turner, B. 1970), quien combinaba la velocidad del viento medida a 10 mts con la irradiación solar durante el día y la cobertura nubosa durante la noche para obtener la clase de estabilidad. Este método no es retrospectivo, sino que es útil para determinar la clase de estabilidad en el momento en que se necesite. Además depende fuertemente de la percepción del observador, es decir que no resulta ser un método objetivo.

Luego, a partir del método desarrollado por Pasquill, Turner desarrolló su propio esquema, realizando ajustes al modelo anterior y determinando la irradiación solar a partir del ángulo solar, el cual es función del momento del día y del año, así como de la latitud del sitio de interés (Hunter, C., 2012).

Si bien son métodos antiguos, ambos resultan útiles cuando no se encuentran disponibles los datos meteorológicos del sitio, ya que los parámetros pueden ser estimados por observación o por cálculo.

Otro método reconocido, más moderno y muy utilizado, es la medición del $\sigma\theta$ (sigma – theta), ésta magnitud es la medida de la fluctuación horizontal de la dirección del viento. Matemáticamente, es la desviación estándar de la dirección horizontal del viento³. Debido a que las torres meteorológicas que se encuentran instaladas en CNE y CNA aún no poseen los instrumentos necesarios para poder medir esta magnitud, no se la incluyó. Está previsto implementar esta herramienta en el corto plazo, e incluirla como un tercer método de estimación de la clase de estabilidad.

- Datos del Término Fuente

En cuanto a los datos del término fuente, los programas necesitan cierta información de entrada como altura de la emisión, altura de la chimenea, calor liberado, hora de inicio y duración de la descarga, retardo de la emisión, fecha y hora del scram, inventario liberado (por grupo de radionucleidos o por radionucleido individual).

Estos datos deben ser provistos por los operadores de la Central Nuclear involucrada en la emergencia. Durante los ejercicios realizados periódicamente se utilizan escenarios hipotéticos de término fuente liberado, en base a los inventarios reales de los tres reactores nucleares argentinas en operación.

Otros datos necesarios que si bien no son del término fuente se encuentran relacionados a la instalación son: coordenadas geográficas, altura sobre el nivel del mar y relieve del terreno.

3.2. Descripción de los modelos

- **Sistema de Evaluación de Dosis en Accidentes (SEDA)**

El SEDA es un Sistema desarrollado en la ARN, con el objetivo de evaluar la dosis en caso de Emergencia Nuclear, así como también en simulacros y ejercicios de emergencia. Es un código de cálculo basado en un modelo gaussiano de dispersión atmosférica aplicable a liberaciones de materiales radiactivos presentes en una central nuclear. No considera los efectos del relieve, por lo cual su uso es más adecuado para la Central Nuclear Atucha (CNA), ubicada en la provincia de Buenos Aires sobre un relieve llano. No así para la Central Nuclear Embalse (CNE), ubicada en la provincia de Córdoba donde el relieve predominante es de sierras.

³ Fuente: http://www-metdat.llnl.gov/cgi-pub/faq.pl#sigma_theta

Como se describió anteriormente los datos de entrada son datos meteorológicos (velocidad, dirección e intensidad del viento, cobertura nubosa o gradiente térmico vertical o clase de estabilidad atmosférica) y datos de la liberación de los contaminantes (una estimación cualitativa y cuantitativa de los radionucleidos liberados a la atmósfera).

Sus resultados son:

- Líneas de isodosis e isoconcentración georreferenciadas que determinan las zonas donde se deberían tomar las contramedidas.
- Valores de dosis y concentración en cualquier punto de la zona de interés.

Su velocidad de cálculo y su interfaz intuitiva son sus principales ventajas y lo hacen apropiado para su uso en situaciones accidentales, donde el conocimiento de los datos de entrada es bastante limitado. Luego, con el arribo de datos más precisos provenientes del monitoreo ambiental, se reevalúan las estimaciones pudiendo ser necesario modificar la extensión de las zonas de emergencia.

Por estar basado en un modelo gaussiano la confiabilidad de los resultados disminuye con la distancia y no debería ser usado más allá de los 20 km.

Productos obtenidos:

En la visualización de la corrida realizada se pueden observar las isolíneas que determinan las zonas donde la población recibiría dosis tales que podrían sufrir efectos determinísticos tales como síndrome hematopoyético, hipotiroidismo, eritema, radiodermatitis, etc. También pueden observarse las isolíneas correspondientes a las zonas donde deberían practicarse las medidas de protección, debido a que en esas zonas la dosis recibida por la población podría incrementar sus probabilidades de sufrir efectos estocásticos en el futuro.

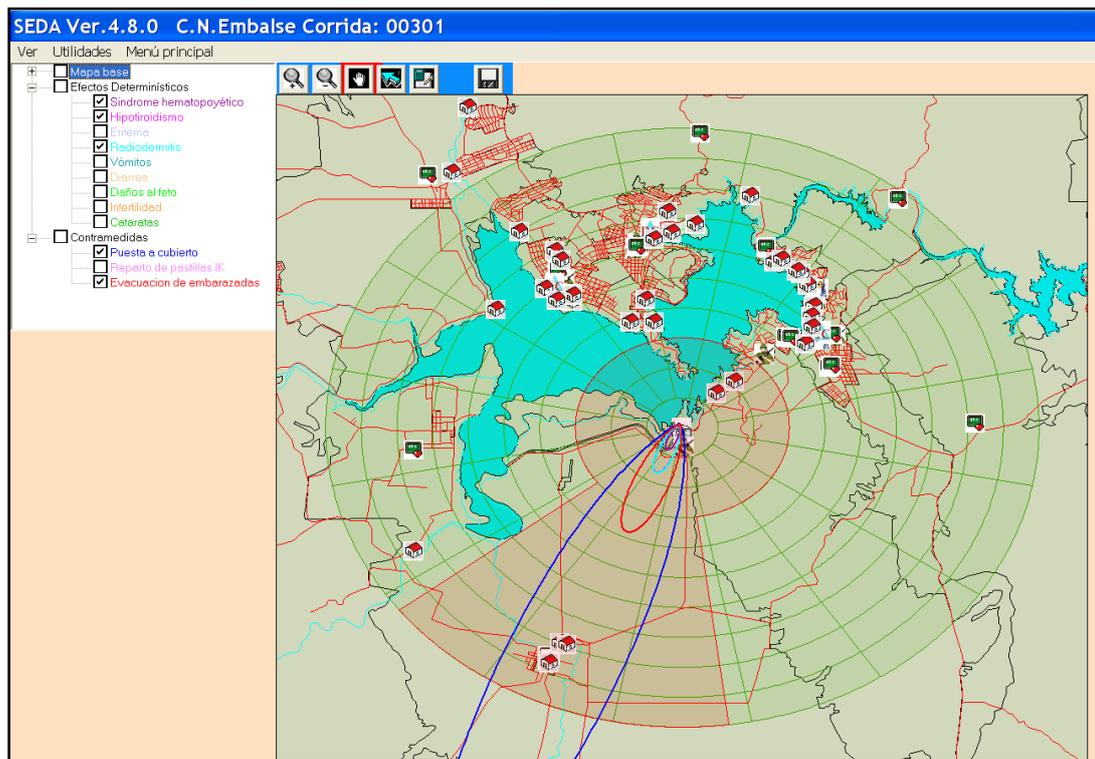


Figura 1. Visualización de una salida del SEDA

También provee de información acerca de Dosis Totales en cada órgano, Dosis por inhalación, Dosis efectivas, Dosis por depósito y Dosis comprometida en un punto geográfico elegido. También brinda información de Tasa de dosis, Tasa de exposición y Depósito total en cualquier punto deseado.

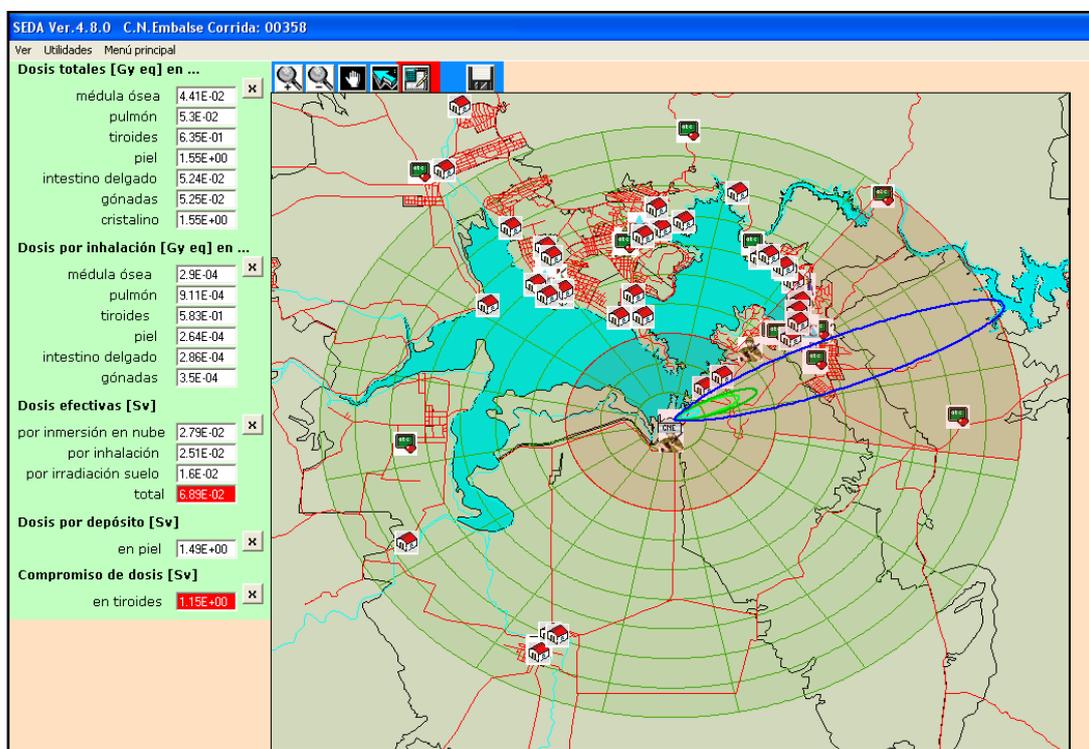


Figura 2. Visualización de una salida del SEDA. Dosis calculadas.

- **International eXchange Program (IXP)**

El IXP fue desarrollado por el NARAC⁴ (National Atmospheric Release Advisory Center), perteneciente al Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) y dependiente del Departamento de Energía / Administración Nacional de Seguridad Nuclear (DOE/NNSA) de EEUU. El NARAC fue fundado en 1979 como parte de la respuesta a la emergencia en la Central Nuclear Three Mile Island. Desde ese momento participa en la respuesta frente a accidentes nucleares (como el de Chernobyl), derrames químicos, incendios, erupciones volcánicas, ejercicios radiológicos y nucleares.

El IXP es una interfase web que permite al usuario realizar el modelado de una pluma para distintos escenarios de emisión, el usuario puede:

- Ingresar rápidamente una descripción simplificada de una emisión atmosférica de material radiactivo;

⁴ El NARAC ofrece a través de un sitio web el Programa de Intercambio Internacional (IXP) como apoyo de las organizaciones internacionales a través de la Oficina de Manejo de Emergencias y Cooperación Internacional de DOE/NNSA. Para obtener una cuenta de acceso al IXP es necesario pertenecer a una Autoridad Nacional Competente y ser aprobado por el DOE de EEUU.

- Enviar la información electrónicamente al NARAC para su procesamiento;
- Recibir como producto una predicción de dispersión atmosférica y de dosis basado en el modelo lagrangiano del NARAC 3D;
- Descargar fácilmente los resultados como capas de información compatibles con los Sistemas de Información Geográfica (SIG);
- Recibir una predicción de dispersión y de dosis refinada (elaborada por científicos del NARAC), (Kunst, J. et. al, 2008);
- Obtener fácilmente un reporte estandarizado de las consecuencias.

El reporte describe las consecuencias en la salud asociadas con una hipotética emisión a la atmósfera desde una fuente radiactiva emisora. Este es un producto inicial, la predicción debe ser confirmada y refinada usando mediciones. El reporte brinda Dosis Efectiva Total Proyectada que exceda el criterio genérico (100 mSv), Dosis proyectada en tiroides que exceda el criterio genérico (50 mSv), Tasa de Dosis debido al depósito, Depósito Total y Dosis Efectiva Total Recibida que exceda criterio genérico (100 mSv).

Éste programa posee un sistema de modelado automatizado y validado en tiempo real que simula flujos de viento atmosférico, pronósticos meteorológicos y modelos de dispersión para distintas escalas: local, regional, continental y global. El modelo es aplicable a cualquier lugar del mundo en tiempo real.

Los datos de entrada son datos de la liberación de los contaminantes (una estimación cualitativa y cuantitativa de los radionucleidos liberados a la atmósfera) y las coordenadas geográficas del punto donde se produce la liberación. Con respecto a los datos meteorológicos existen dos opciones, no incorporar datos y hacer que el programa ejecute su propio modelo de campos de viento atmosférico en 3D; o, la segunda opción es incorporar los datos meteorológicos locales accediendo sólo al modelo 2D gaussiano, también desarrollado por el (LLNL), llamado HotSpot⁵.

Los resultados disponibles son:

- Isolíneas de tasa de exposición;
- Isolíneas de actividad del material radiactivo depositado sobre el terreno;
- Recomendación de contramedidas.

● Modelos del WMO

La Organización Meteorológica Mundial (WMO) provee asistencia en cuanto a modelado de dispersión atmosférica a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina. En caso de emergencia radiológica o nuclear se requiere la asistencia al SMN, de acuerdo al procedimiento existente, éste a su vez envía el pedido de asistencia al WMO, quien coordina los Centros Meteorológicos Regionales Especializados (RSMC). Los distintos RSMC brindan asistencia suministrando productos de modelos de transporte para la respuesta a emergencias ambientales. Los RSMC asignados a América del Sur, y por lo tanto a Argentina son RSMC Washington (EEUU) y RSMC Montreal (Canadá).

El procedimiento para casos de emergencia nuclear indica que el operador encargado de la ARN debe completar un formulario que contenga datos de la emisión, de la ubicación geográfica, así como también datos meteorológicos locales. El SMN recibe la información y la retransmite a los RSMC correspondientes, quienes procesan la información, corren sus mode-

⁵ <https://narac.llnl.gov/HotSpot/HotSpot.html>

los y envían los productos al SMN argentino. Estos productos son accesibles desde un sitio web al que ARN puede acceder en forma on line.

Los modelos de transporte atmosférico (ATM) usados por los RSMC son modelos numéricos complejos de la atmósfera que simulan el transporte a larga distancia, la difusión y el depósito de trazadores o material radioactivo en el aire. Las salidas de estos modelos están disponibles dentro de las 3 horas como máximo⁶.

El RSMC Washington utiliza el modelo Hysplit desarrollado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). El modelo HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) es un sistema completo para el cálculo de trayectorias de dispersión y depósito, utilizando una distribución tipo “puff” en la dimensión horizontal y una distribución de partícula en la dirección vertical. HYSPLIT posee una estructura de biblioteca modular con los principales programas para cada aplicación principal: trayectorias y concentraciones en el aire (Draxler, R, et al, 2014).

El RSMC Montreal es el Centro Meteorológico de Canadá (CMC) y fue designado por la WMO para brindar asistencia con modelos de transporte atmosférico en caso de una emergencia ambiental. El modelo utilizado en el MLDP0 (Modèle Lagrangien de Dispersion de Particules d'ordre 0) el cual es un completo modelo lagrangiano en 3 dimensiones para el transporte a media y larga distancia de contaminantes en la atmósfera. El MLDP0 puede calcular la trayectoria de unas pocas parcelas de aire en movimiento en campos de viento en 3 dimensiones, pudiendo estimar también la trayectoria de las parcelas a diferentes niveles de altura en la dirección vertical. Sólo considera el transporte debido al viento, ningún otro factor físico o atmosférico.

Productos obtenidos:

A continuación se presenta una salida correspondiente al RSMC Washington y otra del RSMC Montreal, solicitadas como parte del Ejercicio de Aplicación del Plan de Emergencia de CNA 2013.

⁶ <http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFSERA/td778-Sec1.htm>

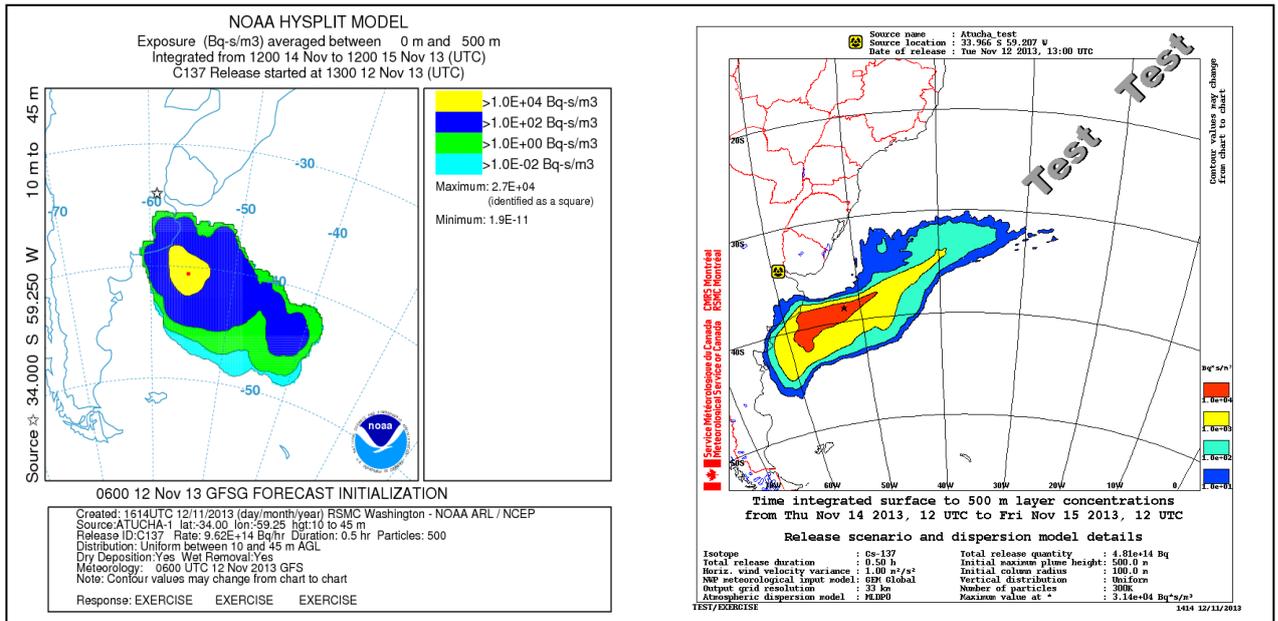


Figura 3. Visualización de los productos de RSMC Washington y RSMC Montreal, Simulacro CNA 2013.

4. INTERRELACIÓN DE LOS MODELOS CON EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Desde el año 2003, el Centro Control de Emergencias de la ARN (CCE) cuenta con una herramienta geomática versátil para la planificación de la respuesta en emergencias, con especial énfasis en las emergencias nucleares. Su utilidad principal radica en la posibilidad de crear modelos y representaciones de situaciones conflictivas sobre el terreno. La construcción de estos escenarios constituye un instrumento muy eficaz a la hora de analizar las tendencias y evaluar las consecuencias de la toma de decisiones.

El objetivo principal del SIG desarrollado en la ARN es dar el apoyo necesario para la planificación, entrenamiento y aplicación de las acciones necesarias frente a una emergencia nuclear, brindando la base cartográfica georreferenciada, la disponibilidad de recursos logísticos en todo el país, incorporando resultados de modelos de previsión de consecuencias y mediciones ambientales durante la emergencia, posibilitando el análisis de dicha información en tiempo real y facilitando la presentación de resultados para la toma de decisiones. La base cartográfica se compone de: datos demográficos, socioeconómicos, organizaciones intervinientes en la emergencia, infraestructura vial y aspectos topográficos de la zona en cuestión (Sadañowski, I. et al, 2006).

Los resultados de los modelos de previsión de consecuencias que pueden ser integrados en el SIG como capas de información son los ya descriptos: SEDA, IXP y productos del RSMC Washington (los resultados del RSMC Montreal son imágenes con formato GIFF y no pueden integrarse en el SIG como el resto de las capas de información).

Los resultados de los modelos que se integran a los datos del SIG, abarcan desde el área delimitada por las distintas concentraciones en aire, tasa de dosis y valores de depósito en suelo calculados, hasta las zonas donde deberían aplicarse las medidas de protección al público

urgentes o tempranas. Las zonas delimitadas de esta forma, al ser incorporadas al Sistema de Información Geográfica pueden analizarse e interrelacionarse con la información almacenada en la base de datos del CCE. Un análisis de este tipo permite, entre otras cosas, determinar la cantidad de escuelas dentro de la zona donde debe aplicarse la medida de protección de puesta a cubierto, calcular la cantidad de población a ser evacuada, clasificar las zonas donde los productos locales producidos deben ser restringidos y, planificar la estrategia de monitoreo radiológico y las acciones de mitigación post-emergencia.

A continuación se muestran ejemplos de aplicación de salidas del SEDA e IXP con el SIG para su utilización durante Ejercicios de Aplicación del Plan de Emergencia de las Centrales Nucleares Atucha y Embalse:

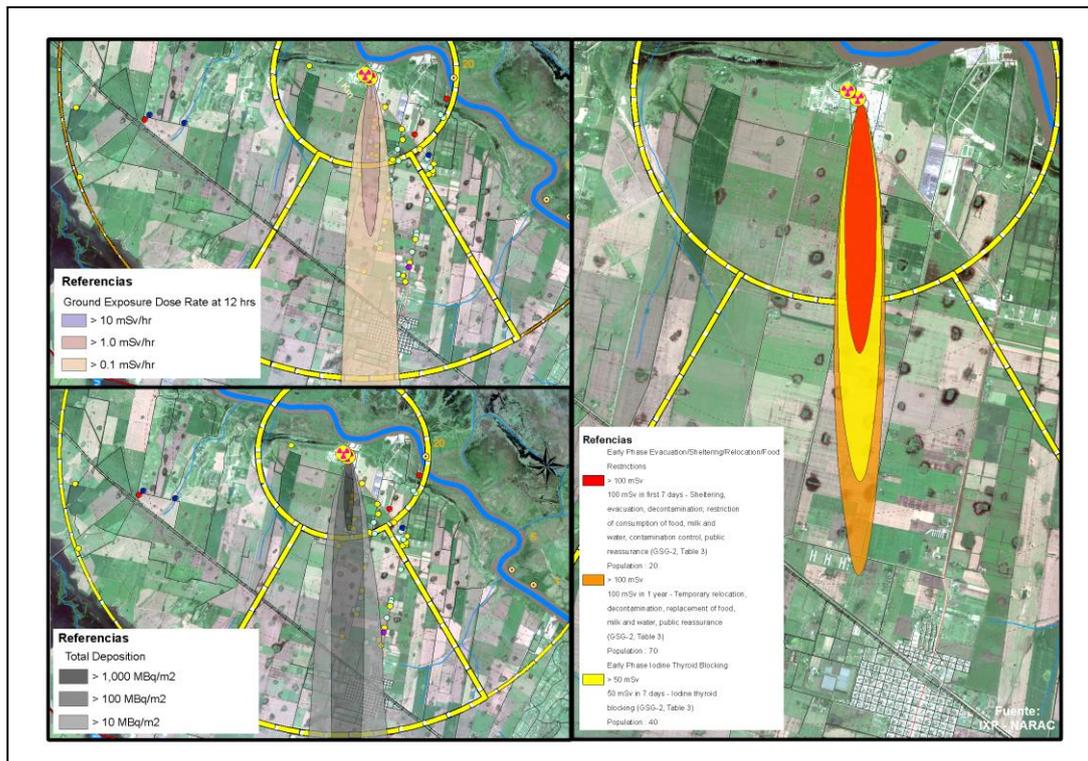


Figura 4. Ejemplo de integración de los datos del IXP al SIG, Ejercicio de Aplicación del Plan de Emergencia de la CNA, año 2013.

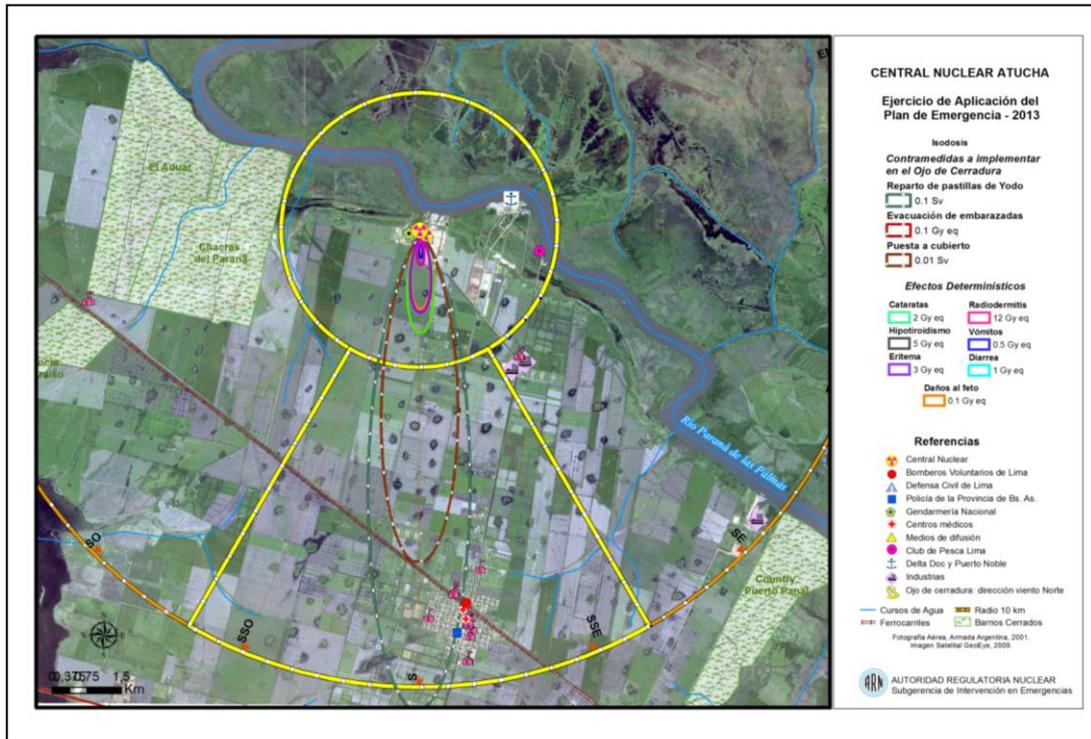


Figura 5. Ejemplo de integración de datos del SEDA al SIG, Ejercicio de Aplicación del Plan de Emergencia de la CNA, año 2013.

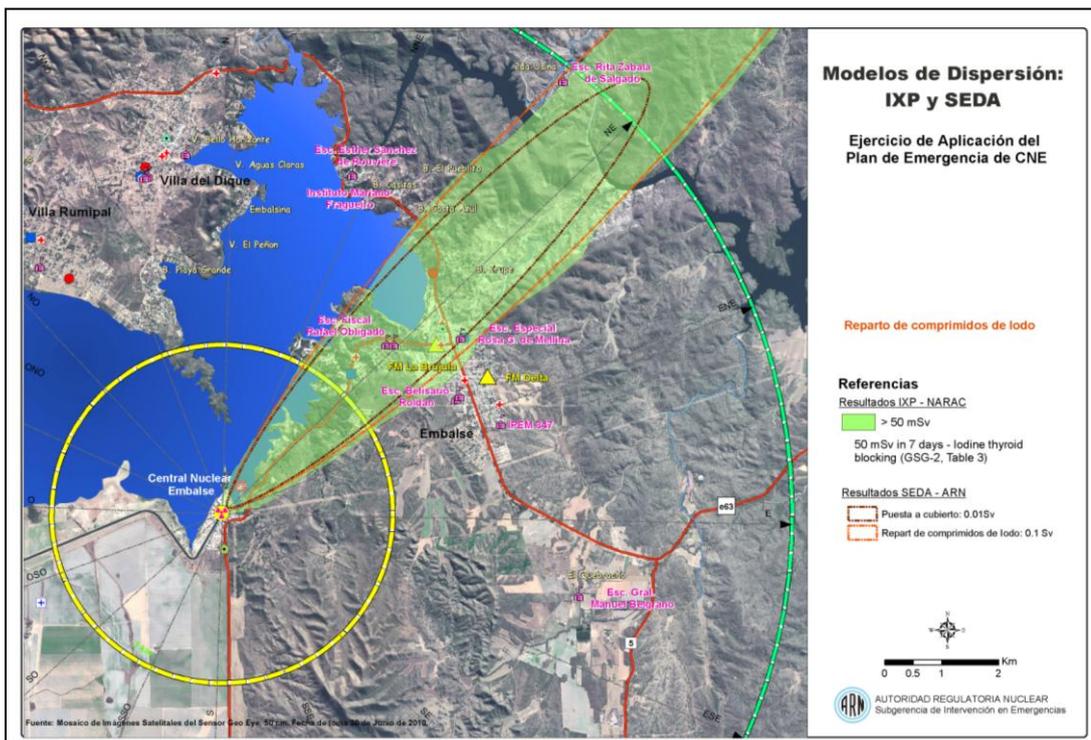


Figura 6. Ejemplo de integración de datos del SEDA e IXP al SIG, Ejercicio de Aplicación del Plan de Emergencia de CNE, año 2014.

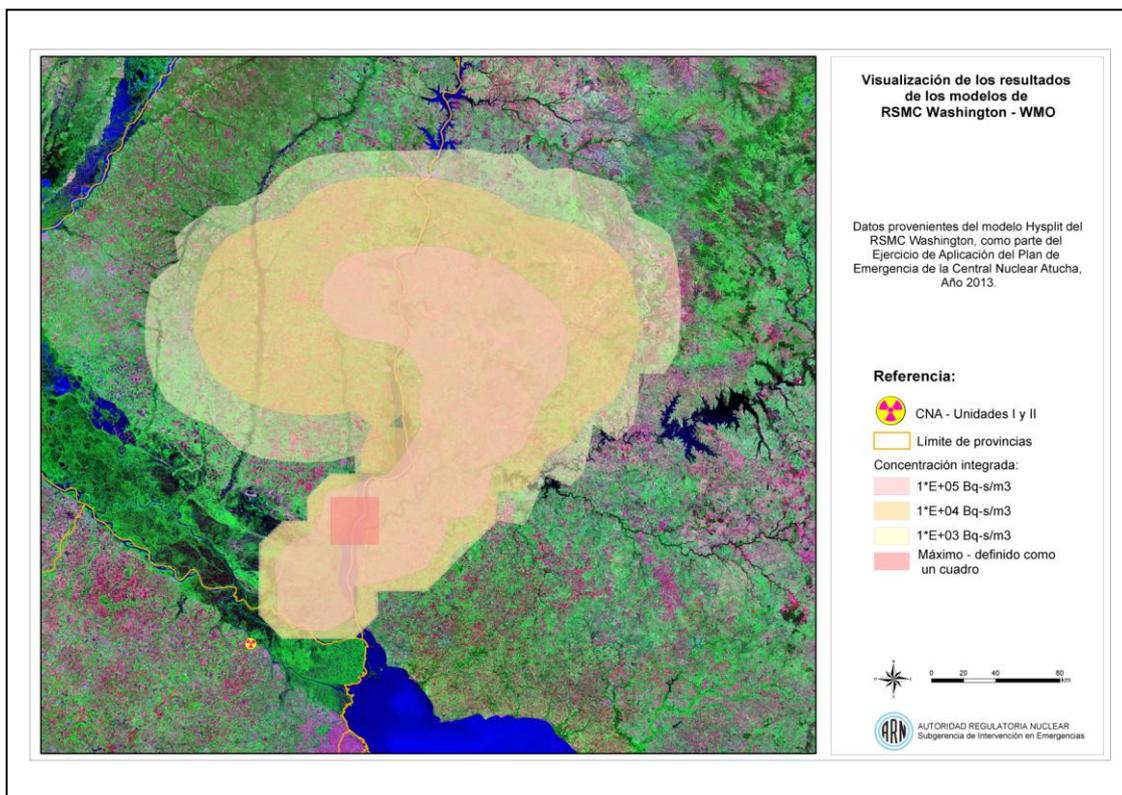


Figura 7. Ejemplo de integración de datos del WMO - RSMC Washington al SIG, Ejercicio de Aplicación del Plan de Emergencia de CNA, año 2013.

5. CONCLUSIONES

Como se ha desarrollado en este trabajo el Centro Control de Emergencias (CCE) de la ARN cuenta con modelos de cálculo para evaluar las consecuencias ante una emergencia radiológica y nuclear en Argentina. Estas herramientas posibilitan evaluar distintos aspectos además del radiológico, como el impacto económico y social de las acciones llevadas a cabo por los responsables de la toma de decisiones, tanto en ejercicios y simulacros como en emergencias reales.

Los modelos con que se cuenta (SEDA, IXP, WMO), cubren las diferentes escalas geográficas que se deberán tener en cuenta para planificar las acciones a seguir frente a una situación de emisión de material radioactivo al ambiente.

La integración de los productos de los modelos presentados con el sistema de información geográfica, tiene como objetivo plantear escenarios ante una situación de emergencia radiológica y nuclear, cuya evaluación permitirá tomar decisiones óptimas en cuanto a la utilización de recursos (humanos, materiales, de comunicación, etc.).

Los resultados de los modelos son importantes a la hora de priorizar los escenarios planteados, por ejemplo, la zona de restricción de alimentos producidos localmente. Pero está claro que la estrategia de actuación en una emergencia nuclear debe estar predefinida con anterioridad a que se produzca una situación de emergencia. Los resultados del monitoreo son claves para validar los modelos y determinar si se debe modificar la estrategia planificada, por ejemplo, ampliar la zona de descontaminación.

Cabe destacar la importancia de evaluar el término fuente con el objetivo de determinar las consecuencias radiológicas del accidente para ello, existe la posibilidad de aplicar una estimación inversa de los modelos de dispersión basada en los datos del monitoreo ambiental.

Finalmente se destaca la importancia de la integración de los modelos con el SIG en las diferentes etapas de la emergencia. En la etapa de preparación de la respuesta (antes del accidente), y durante la emergencia deben imprescindiblemente ser complementados con datos de monitoreo de campo que verifiquen o permitan el ajuste de la proyección obtenida en los modelos. En la etapa post-emergencia también resultan útiles para evaluar las decisiones implementadas en la etapa temprana y analizar la posible ampliación o modificación de las medidas tomadas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2012), *Emergency Preparedness and Response and Post-Accident Management*, Second CNS Extraordinary meeting Argentine National Report.
- Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A., Taylor, A. (2014), *HYSPLIT4 USER's Guide Overview (S000)*, Version 4, disponible en http://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf
- Environmental Emergency Response Section, RSMC Montréal Canadian Meteorological Centre, Meteorological Service of Canada, (2012), *RSMC Montreal – Users Interpretation Guidelines - Atmospheric Transport Model Outputs*, Versión 11, Québec, Canada.
- Environmental Protection Agency (EPA), (2000), *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory, Modeling Applications*, Office of Air Quality Planning & Standards, EPA-454/R-99-005, United States.
- Environmental Protection Agency (EPA), (1993), *Evaluation of a Solar Radiation-Delta-T Method for Estimating Pasquill-Gifford P-G Stability Categories*, EPA-454/R-93-005, United States.
- Hunter, C., (2012), *A Recommended Pasquill-Gifford Stability Classification Method for Safety Basis Atmospheric Dispersion Modeling at SRS*, Savannah River National Laboratory (SRNL), USA.
- Kunst, J.; Boutet, L.; Jordán, O.; Hernández, D.; Guichandut, M. and Chiappesoni (2008), H, *Meteorology and Dispersion Forecast in Nuclear Emergency in Argentina*, 12th IRPA, Buenos Aires, Argentina.
- The National Diet of Japan, (2012), *The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*, Cap. 4, Japan.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (2007), NRC Regulatory Guide 1.23, *Meteorological Monitoring Programs for Nuclear Power Plants*, USA.

- Sadañowski, I.; Tellería, D.; Jordan, O.; Bruno, H.; Boutet, L.; Hernández, D. (2006), *Implementación de un Sistema de Información Geográfico en Emergencias Nucleares*, Memorias CIC Acapulco 2006 en CDROM 1, Primer Congreso Americano del IRPA 2006 /XXIV Reunión Anual de la SMSR y XVII Congreso Anual de la SNM, México.
- Turner, B. (1970), *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, US. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, USA.
- http://www-metdat.llnl.gov/cgi-pub/faq.pl#sigma_theta, Página web oficial del Lawrence Livermore National Laboratory, con acceso al 16 de enero de 2015.
- https://narac.llnl.gov/uploads/NARAC_FactSheet_Final_2010Jun.pdf, con acceso al 10 de febrero de 2015.
- <http://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFSERA/td778-Sec1.htm>, con acceso al 11 de febrero de 2015.
- http://www.ciecem.uhu.es/hysplitweb08/HYSPLIT_info.php, con acceso al 11 de febrero de 2015.